



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2020-0077364  
(43) 공개일자 2020년06월30일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
E02D 27/34 (2006.01) G06F 30/00 (2020.01)  
(52) CPC특허분류  
E02D 27/34 (2013.01)  
G06F 30/13 (2020.01)  
(21) 출원번호 10-2019-0022336  
(22) 출원일자 2019년02월26일  
심사청구일자 2019년02월26일  
(30) 우선권주장  
1020180166022 2018년12월20일 대한민국(KR)

(71) 출원인  
연세대학교 산학협력단  
서울특별시 서대문구 연세로 50 (신촌동, 연세대학교)  
(72) 발명자  
정상섭  
서울특별시 강남구 광평로19길 15, 106동 1104호 (일원동, 목련타운아파트)  
임현성  
경기도 광주시 탄벌길37번길 33, 202호(탄벌동)  
(74) 대리인  
김인철

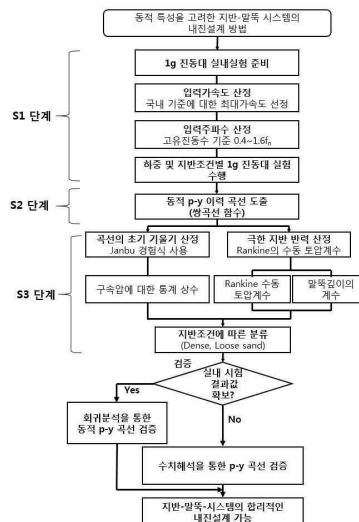
전체 청구항 수 : 총 22 항

(54) 발명의 명칭 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 시스템 및 내진설계 방법

### (57) 요약

본 발명은 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 시스템으로서, 1g 진동대 실험으로 복수의 범위에 대한 주파수 및 가속도의 입력값을 산정하는 입력값 산정부(100); 상기 입력값 산정부(100)에서 구한 입력주파수 및 입력가속도 범위에서 최초 동적 p-y 곡선을 생성하는 최초 동적 p-y 곡선 생성부(200); 상기 최초 동적 p-y 곡선으로부터 최대 지반 반력이 나타나는 꼭지점들을 찾아내는 꼭지점 탐색부(300); 및 탐색된 상기 꼭지점들을 연결하여 등가 정적 해석에 적용할 수 있는 최종 동적 p-y 곡선을 도출하는 최종 동적 p-y 곡선 도출부(400)를 포함한다.

대표도 - 도2



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1345281241  
 부처명 교육부  
 연구관리전문기관 한국연구재단  
 연구사업명 이공학학술연구기반구축(R&D)  
 연구과제명 기후변화 적응형 사회기반시설 연구센터  
 기 여 율 1/2  
 주관기관 연세대학교 산학협력단  
 연구기간 2018.06.01 ~ 2019.02.28

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1615009740  
 부처명 국토교통부  
 연구관리전문기관 국토교통과학기술진흥원  
 연구사업명 건설기술연구  
 연구과제명 케이블교량 해외진출 통합 솔루션 개발  
 기 여 율 1/2  
 주관기관 한국도로공사  
 연구기간 2018.01.01 ~ 2018.12.31

---

## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

1g 진동대 실험으로 복수의 범위에 대한 주파수 및 가속도의 입력값을 산정하는 입력값 산정부(100);

상기 입력값 산정부(100)에서 구한 입력주파수 및 입력가속도 범위에서 최초 동적 p-y 곡선을 생성하는 최초 동적 p-y 곡선 생성부(200);

상기 최초 동적 p-y 곡선으로부터 최대 지반 반력이 나타나는 꼭지점들을 찾아내는 꼭지점 탐색부(300); 및

탐색된 상기 꼭지점들을 연결하여 등가 정적 해석에 적용할 수 있는 최종 동적 p-y 곡선을 도출하는 최종 동적 p-y 곡선 도출부(400)를 포함하는 것을 특징으로 하는 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 시스템.

#### 청구항 2

청구항 1에 있어서,

입력값 산정부(100)는 입력 하중의 입력주파수를 산정하는 입력주파수 산정부(110) 및 말뚝 시스템의 고유진동수가 고려된 입력가속도 산정부(120)를 포함하며, 하중과 지반조건별 1g 진동대 실험을 수행하는 것을 특징으로 하는 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 시스템.

#### 청구항 3

청구항 2에 있어서, 상기 입력주파수 산정부(110)는

스윙 테스트를 통해 특정 조건의 고유진동수(fn)를 산정하고, 고유진동수를 기준으로 0.4fn ~ 1.6fn의 비율로 입력주파수를 산정하는 것을 특징으로 하는 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 시스템.

#### 청구항 4

청구항 2에 있어서, 상기 입력가속도 산정부(120)는

입력주파수를 고유진동수와 동일한 1.0fn으로 고정된 후, 조밀한 지반의 상대밀도(Dr)가 80%일 때는 입력가속도를 0.098g~0.4g로 변화시키고,

느슨한 지반의 상대밀도(Dr)가 40%일 때는 입력가속도를 0.098g~0.3g로 변화시키는 것을 특징으로 하는 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 시스템.

#### 청구항 5

청구항 1에 있어서,

최초 동적 p-y 곡선 생성부(200)는

깊이별 휨모멘트 분포 함수를 결정한 후 다음 수학적 식 1에 따라 2번 미분하여 지반 반력을 산정하고, 다음 수학적 식 2에 따라 2번 적분하여 말뚝의 변위를 산정하는 것을 특징으로 하는 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 시스템.

$$p = \frac{d^2}{dz^2} M(z)$$

[수학적 식 1]

$$y = \int \int \frac{M(z)}{EI} dz$$

[수학적 식 2]

(여기서, p는 지반반력, y은 말뚝의 변위, z는 깊이, EI는 말뚝의 휨 강성, M(z)는 말뚝의 모멘트 분포 함수를

나타낸다)

## 청구항 6

청구항 5에 있어서,

동적 p-y 곡선을 구성하는 변위(y)는 지반-말뚝 간 상대변위이며,

지반 가속도계 계측 값을 2번 적분하여 자유장 지반변위를 산정하고, 말뚝 변위에서 지반 변위를 빼주어 동적 p-y곡선을 생성시키는 것을 특징으로 하는 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 시스템.

## 청구항 7

청구항 1에 있어서,

상기 최종 동적 p-y 곡선 도출부(400)는

최종 동적 p-y 곡선을 도출하기 위하여, 다음의 수학적 식 3을 이용하는 것을 특징으로 하는 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 시스템.

$$p = \frac{y}{\frac{1}{K} + \frac{y}{p_u}}$$

[수학적 식 3]

(여기서, p는 지반의 수평저항력(kN/m), y는 말뚝의 수평변위(m), K는 초기기울기 또는 지반반력계수(kN/m<sup>3</sup>), p<sub>u</sub>는 지반의 극한 수평저항력(kN/m)를 나타낸다)

## 청구항 8

청구항 10에 있어서,

초기 기울기(K)는 다음 수학적 식 4로 결정되는 것을 특징으로 하는 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 시스템.

$$K = AP_a \left( \frac{\sigma'}{P_a} \right)^{0.5}$$

[수학적 식 4]

(여기서, P<sub>a</sub>는 대기압(10.13 N/cm<sup>2</sup>), σ'은 구속압, A는 통계 상수를 나타낸다)

## 청구항 9

청구항 8에 있어서,

통계상수(A)는 선형 회귀분석으로 산출되며, 조밀한 지반의 상대밀도가 80% 일 때 1414.8이며, 느슨한 지반의 상대밀도가 40% 일 때 995.94로 구비되며,

초기 기울기(K) 식은 지반의 상대밀도(D<sub>r</sub>)에 따라, 다음 수학적 식 5 및 수학적 식 6으로 나타나는 것을 특징으로 하는 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 시스템.

$$K = 1414.8 P_a \left( \frac{\sigma'}{P_a} \right)^{0.5}$$

[수학적 식 5] (조밀한 지반, 상대밀도 80%)

$$K = 995.94 P_a \left( \frac{\sigma'}{P_a} \right)^{0.5}$$

[수학적 식 6] (느슨한 지반, 상대밀도 40%)

## 청구항 10

청구항 1에 있어서,

상기 최종 동적 p-y 곡선 도출부(400)는

동적 p-y 곡선의 극한 지반반력(Pu)를 도출하기 위하여, 다음의 수학적 식 7을 이용하는 것을 특징으로 하는 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 시스템.

$$\frac{P_u}{D} = AK_p \gamma' z^n$$

[수학적 식 7]

(여기서, D는 말뚝 지름(cm), Pu/D는 단위 폭당 극한 지반반력(N/cm<sup>2</sup>), Kp는 Rankine의 수동토압계수, r'은 유효 단위중량(N/cm<sup>3</sup>), z는 깊이(cm), A와 n은 통계상수를 나타낸다)

#### 청구항 11

청구항 10에 있어서,

상기 통계상수인 A와 n을 결정하기 위하여, 상기 수학적 식 7을 다음의 수학적 식 8로 변형하여, log 스케일에서 선형 회귀분석을 수행하며,

동적 p-y 곡선의 극한 지반반력(Pu)은 지반의 상대밀도에 따라, 수학적 식 9 및 수학적 식 10로 도출되는 것을 특징으로 하는 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 시스템.

$$\log \frac{P_u}{D} = n \log z + \log AK_p \gamma'$$

[수학적 식 8]

$$\frac{P_u}{D} = 7.10 K_p \gamma' z^{1.97}$$

[수학적 식 9] (조밀한 지반, 상대밀도 80%)

$$\frac{P_u}{D} = 8.21 K_p \gamma' z^{1.88}$$

[수학적 식 10] (느슨한 지반, 상대밀도 40%)

#### 청구항 12

입력값 산정부(100)가 1g 진동대 실험으로 복수의 범위에 대한 주파수 및 가속도의 입력값을 산정하는 S1 단계;

최초 동적 p-y 곡선 생성부(200)가 상기 입력값 산정부(100)에서 구한 입력주파수 및 입력가속도 범위에서 최초 동적 p-y 곡선을 생성하고, 꼭지점 탐색부(300)가 상기 최초 동적 p-y 곡선으로부터 최대 지반 반력이 나타나는 꼭지점들을 찾아내는 S2 단계; 및

최종 동적 p-y 곡선 도출부(400)가 탐색된 상기 꼭지점들을 연결하여 등가 정적 해석에 적용할 수 있는 최종 동적 p-y 곡선을 도출하는 S3 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 방법.

#### 청구항 13

청구항 12에 있어서,

S1 단계의 입력값 산정부(100)는 입력 하중의 입력주파수를 산정하는 입력주파수 산정부(110) 및 말뚝 시스템의 고유진동수가 고려된 입력가속도 산정부(120)를 포함하며, 하중과 지반조건별 1g 진동대 실험을 수행하는 것을 특징으로 하는 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 방법.

#### 청구항 14

청구항 13에 있어서, S1 단계의 상기 입력주파수 산정부(110)는

스윙 테스트를 통해 특정 조건의 고유진동수(fn)를 산정하고, 고유진동수를 기준으로 0.4fn ~ 1.6fn의 비율로 입력주파수를 산정하는 것을 특징으로 하는 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 방법.

### 청구항 15

청구항 14에 있어서, S1 단계의 상기 입력가속도 산정부(120)는

입력주파수를 고유진동수와 동일한  $1.0f_n$ 으로 고정한 후, 조밀한 지반의 상대밀도( $D_r$ )가 80%일 때는 입력가속도를  $0.098g \sim 0.4g$ 로 변화시키고,

느슨한 지반의 상대밀도( $D_r$ )가 40%일 때는 입력가속도를  $0.098g \sim 0.3g$ 로 변화시키는 것을 특징으로 하는 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 방법.

### 청구항 16

청구항 12에 있어서, S2 단계의 최초 동적 p-y 곡선 생성부(200)는

깊이별 휨모멘트 분포 함수를 결정한 후 다음 수학적 식 1에 따라 2번 미분하여 지반 반력을 산정하고, 다음 수학적 식 2에 따라 2번 적분하여 말뚝의 변위를 산정하는 것을 특징으로 하는 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 방법.

$$p = \frac{d^2}{dz^2} M(z)$$

[수학적 식 1]

$$y = \int \int \frac{M(z)}{EI} dz$$

[수학적 식 2]

(여기서, p는 지반반력, y은 말뚝의 변위, z는 깊이, EI는 말뚝의 휨 강성, M(z)는 말뚝의 모멘트 분포 함수를 나타낸다)

### 청구항 17

청구항 12에 있어서, S2 단계의 상기 최종 동적 p-y 곡선 도출부(400)는

최종 동적 p-y 곡선을 도출하기 위하여, 다음의 수학적 식 3을 이용하는 것을 특징으로 하는 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 방법.

$$p = \frac{y}{\frac{1}{K} + \frac{y}{p_u}}$$

[수학적 식 3]

(여기서, p는 지반의 수평저항력(kN/m), y는 말뚝의 수평변위(m), K는 초기기울기 또는 지반반력계수(kN/m<sup>3</sup>),  $p_u$ 는 지반의 극한 수평저항력(kN/m)를 나타낸다)

### 청구항 18

청구항 17에 있어서,

초기 기울기(K)는 다음 수학적 식 4로 결정되는 것을 특징으로 하는 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 방법.

$$K = AP_a \left( \frac{\sigma'}{P_a} \right)^{0.5}$$

[수학적 식 4]

(여기서,  $P_a$ 는 대기압( $10.13 \text{ N/cm}^2$ ),  $\sigma'$ 은 구속압, A는 통계 상수를 나타낸다)

### 청구항 19

청구항 12에 있어서,

통계상수(A)는 선형 회귀분석으로 산출되며, 조밀한 지반의 상대밀도가 80% 일 때 1414.8이며, 느슨한 지반의 상대밀도가 40% 일 때 995.94로 구비되며,

초기 기울기(K) 식은 지반의 상대밀도(Dr)에 따라, 다음 수학적식 5 및 수학적식 6으로 나타나는 것을 특징으로 하는 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 방법.

$$K = 1414.8 P_a \left( \frac{\sigma'}{P_a} \right)^{0.5} \quad \text{[수학적식 5]} \quad (\text{조밀한 지반, 상대밀도 80\%})$$

$$K = 995.94 P_a \left( \frac{\sigma'}{P_a} \right)^{0.5} \quad \text{[수학적식 6]} \quad (\text{느슨한 지반, 상대밀도 40\%})$$

## 청구항 20

청구항 12에 있어서,

상기 최종 동적 p-y 곡선 도출부(400)는

동적 p-y 곡선의 극한 지반반력(Pu)를 도출하기 위하여, 다음의 수학적식 7을 이용하는 것을 특징으로 하는 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 방법.

$$\frac{p_u}{D} = A K_p \gamma' z^n \quad \text{[수학적식 7]}$$

(여기서, D는 말뚝 지름(cm), Pu/D는 단위 폭당 극한 지반반력(N/cm<sup>2</sup>), Kp는 Rankine의 수동토압계수, r'은 유효 단위중량(N/cm<sup>3</sup>), z는 깊이(cm), A와 n은 통계상수를 나타낸다)

## 청구항 21

청구항 20에 있어서,

상기 통계상수인 A와 n을 결정하기 위하여, 상기 수학적식 7을 다음의 수학적식 8로 변형하여, log 스케일에서 선형 회귀분석을 수행하며,

동적 p-y 곡선의 극한 지반반력(Pu)은 지반의 상대밀도에 따라, 수학적식 9 및 수학적식 10로 도출되는 것을 특징으로 하는 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 방법.

$$\log \frac{p_u}{D} = n \log z + \log A K_p \gamma' \quad \text{[수학적식 8]}$$

$$\frac{p_u}{D} = 7.10 K_p \gamma' z^{1.97} \quad \text{[수학적식 9]} \quad (\text{조밀한 지반, 상대밀도 80\%})$$

$$\frac{p_u}{D} = 8.21 K_p \gamma' z^{1.88} \quad \text{[수학적식 10]} \quad (\text{느슨한 지반, 상대밀도 40\%})$$

## 청구항 22

하드웨어와 결합되어, 청구항 12 내지 청구항 21 중 어느 한 항에 따른 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 방법을 실행시키기 위하여 컴퓨터가 판독 가능한 기록매체에 저장된 컴퓨터 프로그램.

**발명의 설명**

**기술 분야**

[0001] 본 발명은 지반-말뚝 시스템의 내진설계 방법에 관한 것이다. 구체적으로는 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 방법에 관한 것이다.

## 배경 기술

[0002] 최근 세계 각지에서 규모 6.0 이상의 대규모 지진 및 지진해일 발생 횟수가 증가하여 많은 인명과 재산 피해가 발생하였음. 국내에서도 1988년 이후 지진발생빈도가 꾸준히 증가하고 있는 추세이며, 최근 2년 사이에 울산 해역에서 규모 5.0의 지진, 경주지역에서 규모 5.8의 지진 및 포항지역에서 규모 5.4의 지진이 발생한다.

[0003] 이에 한국도 더 이상 지진에 대한 안전지대라고 할 수 없다. 지진에 의한 구조물의 변형 및 손상으로 인하여 인명 및 재산피해를 발생시킬 수 있기 때문에 이에 대한 내진설계의 중요성이 점차 커지고 있다.

[0004] 본 발명에서는 국내 설계기준에 적합한 지진하중을 모사할 수 있는 실내 진동대(shaking table) 실험 및 상세해석을 통해서 다양한 형태의 반복하중(cyclic loading)과 동적하중(dynamic loading)이 작용할 때의 하부기초 시스템의 동적 거동을 파악하고 지반반력계수의 특성을 제시하고자 한다. 이를 통해 구조물-기초-지반이 일체화된 상호작용을 고려한 구조물의 동적 거동을 경제적이고 합리적으로 예측할 수 있는 내진해석 및 설계기법을 제안하고자 한다.

[0005] 수평 정적하중(lateral monotonic loading)을 받는 구조물의 말뚝기초 해석시 지반의 비선형성을 고려할 수 있는 p-y 곡선법(지면반력-변위 곡선법)이 널리 이용되고 있다. 말뚝 기초의 내진설계에는 지진하중에 의한 말뚝에 작용하는 관성력을 추가적인 하중으로 작용시켜 해석하는 등가 정적 해석법이 주로 사용되고 있다.

[0006] 등가 정적해석시 수평하중을 받는 말뚝의 횡방향 거동을 해석하기 위하여 지반의 비선형거동을 고려할 수 있는 p-y 곡선법이 널리 이용되고 있다. 수평 정적하중을 받는 경우 지반 조건에 따라 경험적 p-y 곡선 함수가 주로 이용되고 있다.

[0007] 그러나 반복적으로 작용하는 수평하중을 받는 조건에 대해서는 반복하중의 특성을 고려할 수 있는 일반화된 p-y 곡선 모델이 국내·외에서 제시된 것이 없는 실정이다. 이에 동적인 하중 조건임에도 불구하고 정적인 상태에서의 p-y 곡선을 그대로 이용하거나 일부를 수정하여 사용하고 있는 실정이다.

[0008] 기존 연구사례를 통하여 반복적으로 작용하는 수평하중에 대하여 반복하중(cyclic loading)과 동적하중(dynamic loading)의 거동 차이를 알 수 있다.

[0009] 종래 현장 재하시험을 통해 반복하중(cyclic loading)이 지반의 저항력을 감소시킨다는 보고가 있었다. 또한, 반복하중에 의한 지반 저항력의 감소효과는 하중의 반복횟수, 말뚝의 시공 방법 및 반복하중의 크기, 형태 등에 영향을 받는 다는 보고가 있었다.

[0010] 말뚝 기초의 내진설계에는 지진하중에 의한 말뚝에 작용하는 관성력을 추가적인 하중으로 작용시켜 해석하는 등가 정적 해석법이 주로 사용되고 있으며, 등가 정적 해석 시 수평하중을 받는 말뚝의 횡방향 거동을 해석하기 위하여 지반의 비선형거동을 고려할 수 있는 p-y 곡선법이 널리 이용되고 있다.

[0011] p-y 곡선은 다양한 지반조건에서 말뚝 두부에 정적 혹은 반복하중을 재하 하는 실험을 기반으로 개발되었다. 기존에 제시된 대부분의 p-y 곡선은 말뚝 두부에 정적인 하중 혹은 반복하중을 가하여 실험적으로 산정된 p-y곡선으로 말뚝 상부에서의 관성력뿐만 아니라 말뚝 주위 지반의 영향이 함께 고려되어야 하는 동적 하중 조건에서는 적합하지 않다.

[0012] 이를 극복하기 위해 동적하중 조건을 고려한 말뚝의 p-y 곡선에 대한 연구가 진행되고 있다. 종래 기술은 말뚝 두부에 진동을 가하는 실험을 수행하여, 동적 p-y 곡선의 활성화율은 하중 진동수에 큰 영향을 끼치는 것을 확인한 바 있다.

## 선행기술문헌

### 특허문헌

[0013] (특허문헌 0001) (문헌 1) 대한민국 공개특허공보 제10-2005-0112698호 (2005.12.01)

## 발명의 내용

## 해결하려는 과제

- [0014] 본 발명에 따른 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 시스템 및 내진설계 방법은 다음과 같은 해결 과제를 가진다.
- [0015] 첫째, 구조물-지반-말뚝의 상호영향을 고려한 거동 분석을 통해 지진시 기초구조물의 동적 p-y 곡선 영향인자를 제안하고자 한다.
- [0016] 둘째, 현재 설계에서 사용되고 있는 등가정적해석에 대한 제한적 설계법에 대해서 고유 진동수와 하중 진동수를 고려한 합리적인 동적 p-y 곡선을 제안하고자 한다.
- [0017] 본 발명의 해결과제는 이상에서 언급한 것들에 한정되지 않으며, 언급되지 아니한 다른 해결과제들은 아래의 기재로부터 당업자에게 명확하게 이해되어질 수 있을 것이다.

## 과제의 해결 수단

- [0018] 본 발명은 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 시스템으로서, 1g 진동대 실험으로 복수의 범위에 대한 주파수 및 가속도의 입력값을 산정하는 입력값 산정부(100); 상기 입력값 산정부(100)에서 구한 입력주파수 및 입력가속도 범위에서 최초 동적 p-y 곡선을 생성하는 최초 동적 p-y 곡선 생성부(200); 상기 최초 동적 p-y 곡선으로부터 최대 지반 반력이 나타나는 꼭지점들을 찾아내는 꼭지점 탐색부(300); 및 탐색된 상기 꼭지점들을 연결하여 등가 정적 해석에 적용할 수 있는 최종 동적 p-y 곡선을 도출하는 최종 동적 p-y 곡선 도출부(400)를 포함한다.
- [0019] 본 발명에 따른 입력주파수 산정부(110)는 스윙 테스트를 통해 특정 조건의 고유진동수( $f_n$ )를 산정하고, 고유진동수를 기준으로  $0.4f_n \sim 1.6f_n$ 의 비율로 입력주파수를 산정할 수 있다.
- [0020] 본 발명에 따른 입력주파수 산정부(110)는 스윙 테스트를 통해 특정 조건의 고유진동수( $f_n$ )를 산정하고, 고유진동수를 기준으로  $0.4f_n \sim 1.6f_n$ 의 비율로 입력주파수를 산정할 수 있다.
- [0021] 본 발명에 따른 입력가속도 산정부(120)는 입력주파수를 고유진동수와 동일한  $1.0f_n$ 으로 고정한 후, 조밀한 지반의 상대밀도( $D_r$ )가 80%일 때는 입력가속도를  $0.098g \sim 0.4g$ 로 변화시키고, 느슨한 지반의 상대밀도( $D_r$ )가 40%일 때는 입력가속도를  $0.098g \sim 0.3g$ 로 변화시킬 수 있다.
- [0022] 본 발명에 따른 최초 동적 p-y 곡선 생성부(200)는 깊이별 휨모멘트 분포 함수를 결정한 후 수학적 식 1에 따라 2번 미분하여 지반 반력을 산정하고, 수학적 식 2에 따라 2번 적분하여 말뚝의 변위를 산정할 수 있다.
- [0023] 본 발명에 있어서, 동적 p-y 곡선을 구성하는 변위( $y$ )는 지반-말뚝 간 상대변위이며, 지반 가속도계 측정 값을 2번 적분하여 자유장 지반변위를 산정하고, 말뚝 변위에서 지반 변위를 빼주어 동적 p-y곡선을 생성시킬 수 있다.
- [0024] 본 발명에 따른 최종 동적 p-y 곡선 도출부(400)는 최종 동적 p-y 곡선을 도출하기 위하여, 수학적 식 3을 이용할 수 있다.
- [0025] 본 발명에 따른 초기 기울기(K)는 수학적 식 4로 결정될 수 있다.
- [0026] 본 발명에 따른 통계상수(A)는 선형 회귀분석으로 산출되며, 조밀한 지반의 상대밀도가 80% 일 때 1414.8이며, 느슨한 지반의 상대밀도가 40% 일 때 995.94로 구비되며, 초기 기울기(K) 식은 지반의 상대밀도( $D_r$ )에 따라, 수학적 식 5 및 수학적 식 6으로 나타낼 수 있다.
- [0027] 본 발명에 따른 최종 동적 p-y 곡선 도출부(400)는 동적 p-y 곡선의 극한 지반반력( $P_u$ )를 도출하기 위하여, 수학적 식 7을 이용할 수 있다.
- [0028] 본 발명에 따른 통계상수인 A와 n을 결정하기 위하여, 수학적 식 7을 수학적 식 8로 변형하여, log 스케일에서 선형 회귀분석을 수행하며, 동적 p-y 곡선의 극한 지반반력( $P_u$ )은 지반의 상대밀도에 따라, 수학적 식 9 및 수학적 식 10로 도출할 수 있다.
- [0030] 본 발명은 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 방법으로서, 입력값 산정부(100)가 1g 진동대 실험으로 복수의 범위에 대한 주파수 및 가속도의 입력값을 산정하는 S1 단계;

[0031] 최초 동적 p-y 곡선 생성부(200)가 상기 입력값 산정부(100)에서 구한 입력주파수 및 입력가속도 범위에서 최초 동적 p-y 곡선을 생성하고, 꼭지점 탐색부(300)가 상기 최초 동적 p-y 곡선으로부터 최대 지반 반력이 나타나는 꼭지점들을 찾아내는 S2 단계; 및

[0032] 최종 동적 p-y 곡선 도출부(400)가 탐색된 상기 꼭지점들을 연결하여 등가 정적 해석에 적용할 수 있는 최종 동적 p-y 곡선을 도출하는 S3 단계를 포함할 수 있다.

[0033] 본 발명은 컴퓨터 프로그램으로서, 하드웨어와 결합되어, 본 발명에 따른 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 방법을 실행시키기 위하여 컴퓨터가 판독 가능한 기록매체에 저장된 컴퓨터 프로그램인 것이 바람직하다.

### 발명의 효과

[0034] 본 발명에 따른 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 시스템 및 내진설계 방법은 다음과 같은 효과를 가진다.

[0035] 첫째, 지반-기초의 일체화된 상호작용을 고려한 동적 p-y 곡선을 이용함으로써 합리적 내진설계가 가능한 효과가 있다.

[0036] 둘째, 기존 제안식들은 고유진동수와 하중진동수를 고려하지 않은 결과들이었으나 본 기술에서는 고유진동수와 하중진동수의 고려를 통해 동적 p-y 곡선을 제안하여 합리적이며 경제적 설계가 가능한 효과가 있다.

[0037] 본 발명의 효과는 이상에서 언급된 것들에 한정되지 않으며, 언급되지 아니한 다른 효과들은 아래의 기재로부터 당업자에게 명확하게 이해되어 질 수 있을 것이다.

### 도면의 간단한 설명

[0038] 도 1은 본 발명에 따른 지반-말뚝 시스템의 내진설계 시스템의 구성도이다.

도 2는 본 발명에 따른 지반-말뚝 시스템의 내진설계 방법의 순서도이다.

도 3은 수평하중이 작용하는 말뚝의 정적 p-y 곡선을 나타낸다.

도 4는 수평하중이 작용하는 말뚝의 동적 p-y 곡선을 나타낸다.

도 5 내지 도 10은 본 발명에 따른 깊이별 동적 p-y 중추 곡선을 나타낸다.

도 11은 본 발명에 따른 초기 기울기의 결정에 관한 그래프이다.

도 12는 본 발명에 따른 한 지반반력의 결정에 관한 그래프이다.

도 13 내지 도 18은 본 발명에 따른 깊이별 동적 p-y 곡선의 비교를 나타낸다.

도 19는 조밀한 사질토에 대한 깊이별 말뚝 변위 비교를 나타내며, 도 20은 느슨한 사질토에 대한 깊이별 말뚝 변위 비교를 나타낸다.

도 21은 조밀한 사질토에 대한 깊이별 말뚝 휨모멘트 비교를 나타내며, 도 22는 느슨한 사질토에 대한 깊이별 말뚝 휨모멘트 비교를 나타낸다.

도 23은 조밀한 사질토에 대한 깊이별 말뚝 전단력 비교를 나타내며, 도 24는 느슨한 사질토에 대한 깊이별 말뚝 전단력 비교를 나타낸다.

도 25는 입력주파수별 말뚝 두부 최대 변위를 나타낸다.

도 26은 입력가속도별 말뚝시스템의 고유진동수를 나타낸다.

도 27 내지 도 30은 입력주파수에 따른 말뚝 깊이별 동적 p-y 곡선을 나타낸다.

도 31은 각 주파수별 p-y 곡선이다.

### 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0039] 이하, 첨부한 도면을 참조하여, 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 본 발명의 실시예를 설명한다. 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 이해

할 수 있는 바와 같이, 후술하는 실시예는 본 발명의 개념과 범위를 벗어나지 않는 한도 내에서 다양한 형태로 변형될 수 있다. 가능한 한 동일하거나 유사한 부분은 도면에서 동일한 도면부호를 사용하여 나타낸다.

- [0040] 본 명세서에서 사용되는 전문용어는 단지 특정 실시예를 언급하기 위한 것이며, 본 발명을 한정하는 것을 의도하지는 않는다. 여기서 사용되는 단수 형태들은 문구들이 이와 명백히 반대의 의미를 나타내지 않는 한 복수 형태들도 포함한다.
- [0041] 본 명세서에서 사용되는 "포함하는"의 의미는 특정 특성, 영역, 정수, 단계, 동작, 요소 및/또는 성분을 구체화하며, 다른 특정 특성, 영역, 정수, 단계, 동작, 요소, 성분 및/또는 군의 존재나 부가를 제외시키는 것은 아니다.
- [0042] 본 명세서에서 사용되는 기술용어 및 과학용어를 포함하는 모든 용어들은 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자가 일반적으로 이해하는 의미와 동일한 의미를 가진다. 사전에 정의된 용어들은 관련기술문헌과 현재 개시된 내용에 부합하는 의미를 가지는 것으로 추가 해석되고, 정의되지 않는 한 이상적이거나 매우 공식적인 의미로 해석되지 않는다.
- [0043] 도 3은 수평하중이 작용하는 말뚝의 정적 p-y 곡선을 나타내고, 도 4는 수평하중이 작용하는 말뚝의 동적 p-y 곡선을 나타낸다.
- [0044] 종래 기술에서는 도 3 및 도 4와 같이, 정적하중과 반복하중 그리고 동적하중에 대한 p-y 곡선은 엄연히 차이가 있다. 이는 이미 많은 선행 연구자들에 의해 확인된 사실이다. 하지만, 현재 설계에서는 등가정적해석을 이용하여 설계하고 있으며, 또한, 기존 연구결과들은 하중 진동수와 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수를 고려하지 못하고 있다.
- [0045] 그런데 동하중이 작용하는 말뚝의 p-y 곡선은 하중 진동수의 큰 영향을 받고, 하중 진동수에 대한 영향은 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수와 밀접한 관계가 있다.
- [0046] 따라서 본 발명에서는 동하중이 작용하는 말뚝의 하중진동수와 고유 진동수의 영향을 고려한 동적 p-y 곡선을 제안하였다.
- [0047] 이하에서는 도면을 참고하여 본 발명을 설명하고자 한다.
- [0048] 도 1은 본 발명에 따른 지반-말뚝 시스템의 내진설계 시스템의 구성도이다.
- [0049] 본 발명에 따른 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 시스템은 입력값 산정부(100), 최초 동적 p-y 곡선 생성부(200), 꼭지점 탐색부(300) 및 최종 동적 p-y 곡선 도출부(400)를 포함한다.
- [0050] 본 발명에 따른 입력값 산정부(100)는 1g 진동대 실험으로 복수의 범위에 대한 주파수 및 가속도의 입력값을 산정할 수 있다.
- [0051] 본 발명에 따른 최초 동적 p-y 곡선 생성부(200)는 상기 입력값 산정부(100)에서 구한 입력주파수 및 입력가속도 범위에서 최초 동적 p-y 곡선을 생성할 수 있다.
- [0052] 본 발명에 따른 꼭지점 탐색부(300)는 상기 최초 동적 p-y 곡선으로부터 최대 지반 반력이 나타나는 꼭지점들을 찾아낼 수 있다.
- [0053] 본 발명에 따른 최종 동적 p-y 곡선 도출부(400)는 탐색된 상기 꼭지점들을 연결하여 등가 정적 해석에 적용할 수 있는 최종 동적 p-y 곡선을 도출할 수 있다.
- [0054] 본 발명에 따른 입력값 산정부(100)는 입력 하중의 입력주파수를 산정하는 입력주파수 산정부(110) 및 말뚝 시스템의 고유진동수가 고려된 입력가속도 산정부(120)를 포함하며, 하중과 지반조건별 1g 진동대 실험을 수행할 수 있다.
- [0055] 상기 입력주파수 산정부(110)는 스위프 테스트(sweep test)를 통해 특정 조건의 고유진동수(fn)를 산정하고, 고유진동수를 기준으로 0.4fn ~ 1.6fn의 비율로 입력주파수를 산정할 수 있다.
- [0056] 상기 입력가속도 산정부(120)는 입력주파수를 고유진동수와 동일한 1.0fn으로 고정한 후, 조밀한 지반의 상대밀도(Dr)가 80%일 때는 입력가속도를 0.098g~0.4g로 변화시킬 수 있다. 느슨한 지반의 상대밀도(Dr)가 40%일 때는 입력가속도를 0.098g~0.3g로 변화시킬 수 있다.

[0058] 본 발명에 따른 최초 동적 p-y 곡선 생성부(200)는 깊이별 휨모멘트 분포 함수를 결정한 후 다음 수학식 1에 따라 2번 미분하여 지반 반력을 산정하고, 다음 수학식 2에 따라 2번 적분하여 말뚝의 변위를 산정할 수 있다.

### 수학식 1

$$p = \frac{d^2}{dz^2} M(z)$$

[0059]

### 수학식 2

$$y = \int \int \frac{M(z)}{EI} dz$$

[0060]

[0061] 여기서, p는 지반반력, y은 말뚝의 변위, z는 깊이, EI는 말뚝의 휨 강성, M(z)는 말뚝의 모멘트 분포 함수를 나타낸다.

[0062] 동적 p-y 곡선을 구성하는 변위(y)는 지반-말뚝 간 상대변위이며, 지반 가속도계 측정 값을 2번 적분하여 자유장 지반변위를 산정하고, 말뚝 변위에서 지반 변위를 빼주어 동적 p-y곡선을 생성시킬 수 있다.

[0063] 본 발명에 따른 최종 동적 p-y 곡선 도출부(400)는 최종 동적 p-y 곡선을 도출하기 위하여, 다음의 수학식 3을 이용할 수 있다.

### 수학식 3

$$p = \frac{y}{\frac{1}{K} + \frac{y}{p_u}}$$

[0064]

[0065] 여기서, p는 지반의 수평저항력(kN/m), y는 말뚝의 수평변위(m), K는 초기기울기 또는 지반반력계수(kN/m<sup>3</sup>), p<sub>u</sub>는 지반의 극한 수평저항력(kN/m)를 나타낸다.

[0066] 본 발명에서는 동적 p-y 곡선의 초기 기울기와 극한 지반 반력을 구속압과 Rankine의 수동 토압계수를 이용한 함수를 이용한다.

[0067] 본 발명에 따른 초기 기울기(K)는 다음 수학식 4로 결정될 수 있다.

### 수학식 4

$$K = AP_a \left( \frac{\sigma'}{P_a} \right)^{0.5}$$

[0068]

[0069] 여기서, P<sub>a</sub>는 대기압(10.13 N/cm<sup>2</sup>), σ'은 구속압, A는 통계 상수를 나타낸다.

[0070] 도 5 내지 도 10은 본 발명에 따른 깊이별 동적 p-y 중추 곡선을 나타낸다. 회귀분석을 통하여 획득한 동적 p-y 중추곡선과 실험적으로 획득한 동적 p-y 곡선의 최대점을 나타낸다. 이를 통해, 동적 p-y 중추곡선이 지반-말뚝 시스템의 비선형성과 실험값을 잘 반영함을 알 수 있다.

[0071] 도 11은 실험결과로부터 얻은 깊이별 초기 기울기를 나타낸다. 통계 상수 A를 결정하기 위하여 선형 회귀분석을 수행하였으며, 상대밀도 80% 일 때 A는 1414.8이며, 상대밀도 40%일 때 A는 995.94를 나타낸다.

[0072] 본 발명에 있어서, 통계상수(A)는 선형 회귀분석으로 산출되며, 조밀한 지반의 상대밀도가 80% 일 때 1414.8이

며, 느슨한 지반의 상대밀도가 40% 일 때 995.94로 구비되며, 초기 기울기(K) 식은 지반의 상대밀도(Dr)에 따라, 다음 수학적식 5 및 수학적식 6으로 나타낼 수 있다.

### 수학적식 5

$$K = 1414.8 P_a \left( \frac{\sigma'}{P_a} \right)^{0.5}$$

### 수학적식 6

$$K = 995.94 P_a \left( \frac{\sigma'}{P_a} \right)^{0.5}$$

본 발명에 따른 상기 최종 동적 p-y 곡선 도출부(400)는 동적 p-y 곡선의 극한 지반반력(Pu)를 도출하기 위하여, 다음의 수학적식 7을 이용할 수 있다.

### 수학적식 7

$$\frac{p_u}{D} = A K_p \gamma' z^n$$

여기서, D는 말뚝 지름(cm), Pu/D는 단위 폭당 극한 지반반력(N/cm<sup>2</sup>), Kp는 Rankine의 수동토압계수, r'은 유효 단위중량(N/cm<sup>3</sup>), z는 깊이(cm), A와 n은 통계상수를 나타낸다.

통계상수인 A와 n을 결정하기 위하여, 상기 수학적식 7을 다음의 수학적식 8로 변형하여, log 스케일에서 선형 회귀 분석을 수행한다.

동적 p-y 곡선의 극한 지반반력(Pu)은 지반의 상대밀도에 따라, 다음의 수학적식 9 및 수학적식 10로 도출될 수 있다.

### 수학적식 8

$$\log \frac{p_u}{D} = n \log z + \log A K_p \gamma'$$

### 수학적식 9

$$\frac{p_u}{D} = 7.10 K_p \gamma' z^{1.97}$$

# 수학식 10

$$\frac{p_u}{D} = 8.21 K_p \gamma' z^{1.88}$$

[0083]

[0085] 도 12는 본 발명에 따른 한 지반반력의 결정에 관한 그래프이다.

[0086] 한편, 도 13 내지 도 18은 본 발명에 따른 깊이별 동적 p-y 곡선의 비교를 나타낸다. 즉, 실험 결과에 대하여 기존 p-y 곡선과 제안한 p-y 곡선을 비교한 결과를 나타낸다.

[0087] 비교에 사용된 기존 p-y 곡선은 API(1987)와 Reese 등(1974)이 제안한 p-y 곡선을 사용하였다. 해석시 필요한 내부마찰각과 지반반력계수는 API(1987)에서 추천하는 값을 사용하였는데, 느슨한 사질토의 경우 30°이고 조밀한 사질토의 경우 40°를 사용한다. 또한, 조밀한 사질토의 경우 74,134 kPa/m, 느슨한 사질토의 경우 11,948 kPa/m의 지반반력계수를 사용한다.

[0089] 도 13 내지 도 18에 따르면, 기존 p-y 곡선은 실험결과보다 극한 지반반력을 더 작게 예측하는 것을 확인할 수 있다. 이와 반대로 제안한 p-y 곡선을 상대적으로 잘 예측하는 것을 확인할 수 있다.

[0091] 도 19는 조밀한 사질토에 대한 깊이별 말뚝 변위 비교를 나타내며, 도 20은 느슨한 사질토에 대한 깊이별 말뚝 변위 비교를 나타낸다. 즉 조밀한 사질토와 느슨한 사질토에서의 실험결과와 p-y 곡선에 의한 예측값을 보여준다. 이를 통해, API와 Reese 식은 말뚝 변위를 과대 평가하나, 본 발명에 따른 p-y 곡선식은 비교적 실험결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

[0093] 도 21은 조밀한 사질토에 대한 깊이별 말뚝 휨모멘트 비교를 나타내며, 도 22는 느슨한 사질토에 대한 깊이별 말뚝 휨모멘트 비교를 나타낸다. 도 23은 조밀한 사질토에 대한 깊이별 말뚝 전단력 비교를 나타내며, 도 24는 느슨한 사질토에 대한 깊이별 말뚝 전단력 비교를 나타낸다. 즉, 조밀한 사질토와 느슨한 사질토에서 말뚝의 깊이별 휨모멘트와 전단력 분포를 나타낸다.

[0094] 두 가지 경우 모두 다 제안한 p-y 곡선이 실험결과를 상대적으로 잘 예측한다는 것을 확인할 수 있다. 하지만, API와 Reese의 p-y 곡선은 실험 결과보다 휨모멘트와 전단력을 더 작게 예측하는 것으로 확인되었다. 이것은 실험상에 측정된 최대 변위를 발생시키기 위해서 작은 전단력과 휨모멘트만으로도 충분하다는 것을 의미한다. 즉, API와 Reese의 p-y 곡선은 휨모멘트와 전단력을 보수적으로 예측한다는 것을 의미한다.

[0096] 한편, 본 발명은 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 방법으로 구현될 수 있다. 전술한 내진설계 시스템과 공통되는 기술구성 특히 수학식 등은 중복기재를 최소화하면서 본 내진설계 시스템을 설명하고자 한다.

[0097] 본 발명에 따른 내진설계 방법은 입력값 산정부(100)가 1g 진동대 실험으로 복수의 범위에 대한 주파수 및 가속도의 입력값을 산정하는 S1 단계; 최초 동적 p-y 곡선 생성부(200)가 상기 입력값 산정부(100)에서 구한 입력주파수 및 입력가속도 범위에서 최초 동적 p-y 곡선을 생성하고, 꼭지점 탐색부(300)가 상기 최초 동적 p-y 곡선으로부터 최대 지반 반력이 나타나는 꼭지점들을 찾아내는 S2 단계; 및

[0098] 최종 동적 p-y 곡선 도출부(400)가 탐색된 상기 꼭지점들을 연결하여 등가 정적 해석에 적용할 수 있는 최종 동적 p-y 곡선을 도출하는 S3 단계를 포함한다.

[0099] S1 단계의 입력값 산정부(100)는 입력 하중의 입력주파수를 산정하는 입력주파수 산정부(110) 및 말뚝 시스템의 고유진동수가 고려된 입력가속도 산정부(120)를 포함하며, 하중과 지반조건별 1g 진동대 실험을 수행할 수

있다.

- [0100] S1 단계의 상기 입력주파수 산정부(110)는 스위프 테스트를 통해 특정 조건의 고유진동수( $f_n$ )를 산정하고, 고유진동수를 기준으로  $0.4f_n \sim 1.6f_n$ 의 비율로 입력주파수를 산정할 수 있다.
- [0101] S1 단계의 상기 입력가속도 산정부(120)는 입력주파수를 고유진동수와 동일한  $1.0f_n$ 으로 고정한 후, 조밀한 지반의 상대밀도( $D_r$ )가 80%일 때는 입력가속도를  $0.098g \sim 0.4g$ 로 변화시키고, 느슨한 지반의 상대밀도( $D_r$ )가 40%일 때는 입력가속도를  $0.098g \sim 0.3g$ 로 변화시킬 수 있다.
- [0102] S2 단계의 최초 동적 p-y 곡선 생성부(200)는 깊이별 휨모멘트 분포 함수를 결정한 후 수학적 식 1에 따라 2번 미분하여 지반 반력을 산정하고, 수학적 식 2에 따라 2번 적분하여 말뚝의 변위를 산정할 수 있다.
- [0103] S2 단계의 상기 최종 동적 p-y 곡선 도출부(400)는 최종 동적 p-y 곡선을 도출하기 위하여, 수학적 식 3을 이용할 수 있다.
- [0104] 초기 기울기(K)는 수학적 식 4로 결정될 수 있다.
- [0105] 통계상수(A)는 선형 회귀분석으로 산출되며, 조밀한 지반의 상대밀도가 80% 일 때 1414.8이며, 느슨한 지반의 상대밀도가 40% 일 때 995.94로 구비되며, 초기 기울기(K) 식은 지반의 상대밀도( $D_r$ )에 따라, 수학적 식 5 및 수학적 식 6으로 나타낼 수 있다.
- [0106] 최종 동적 p-y 곡선 도출부(400)는 동적 p-y 곡선의 극한 지반반력( $P_u$ )를 도출하기 위하여, 다음의 수학적 식 7을 이용할 수 있다.
- [0107] 또한, 수학적 식 7을 수학적 식 8로 변형하여, log 스케일에서 선형 회귀분석을 수행하여, 동적 p-y 곡선의 극한 지반반력( $P_u$ )은 지반의 상대밀도에 따라, 수학적 식 9 및 수학적 식 10로 도출될 수 있다.
- [0109] 한편, 본 발명은 컴퓨터프로그램으로 구현될 수도 있다. 본 발명은 하드웨어와 결합되어, 본 발명에 따른 동적 특성을 고려한 지반-말뚝 시스템의 내진설계 방법을 실행시키기 위하여 컴퓨터가 판독 가능한 기록매체에 저장된 컴퓨터 프로그램인 것이 바람직하다.
- [0111] 이하에서는, 실제 실험을 수행하면서, 본 발명을 보다 상세하게 설명하고자 한다.
- [0112] **실험방법 및 실험조건**
- [0113] 암반의 근입 효과를 위해 말뚝을 높이 9cm 알루미늄 플레이트에 고정시켰으며, 알루미늄 플레이트는 진동중 움직이지 않도록 볼트를 토조 바닥판에 체결하였다.
- [0114] 지반은 높이 70cm로 조성되었고 진동다짐을 이용하여 시료를 조성하였다. 조밀한 지반의 경우 높이 15cm마다 진동다짐을 실시하여 상대밀도 80%를 조성하였으며, 느슨한 지반의 경우 최종 시료 조성 후 진동다짐을 실시하여 상대밀도 40%를 조성하였다. 계획고까지 흙은 채운 후, 수평지반이 될 수 있도록 넓은 붓을 사용하여 고르게 퍼줌으로서 지반조성을 마무리한다.
- [0115] 말뚝 캡과 상부하중을 말뚝 상단에 설치한 후 가속도계를 부착하였으며, 말뚝 캡 양단에 LVDT를 설치하였다.
- [0117] **다양한 주파수 및 가속도 범위 선정 기준**
- [0118] 지진 하중으로 정현파인 Sine파를 조건별로 5초 동안 사용하였다. 하중의 크기는 1등급, 특등급 붕괴방지수준을 포함하여  $0.098g \sim 0.4g$ 까지 변화시켰다. 또한, 실 지진파가 다양한 주파수 성분을 가지고 있는 만큼 입력 주파수를 달리하여 실험을 수행하였다. 입력 하중 즉 입력 지진파의 주파수를 결정하기 위해 스위프 테스트(sweep test)를 통하여 각 조건의 고유진동수를 산정하여, 고유진동수를 기준으로  $0.4f_n \sim 1.6f_n$ 의 비율로 입력주파수를 산정하였다.

[0120] **입력주파수**

- [0121] 입력주파수에 따른 해상 자켓 기초구조물의 동적 거동을 분석한다. 이를 위해 입력가속도는 0.22g, 상대밀도는 80%의 조건에서 입력주파수를 변화시켜가며 실험을 수행하였다.
- [0122] 먼저, 입력주파수를 산정하기 위하여 스위프 테스트(sweep test)를 수행하였으며, 이를 토대로  $0.4f_n \sim 1.6f_n$  ( $f_n$ = 고유진동수)까지의 입력 주파수로 실험을 수행하였다.
- [0123] 도 25는 입력주파수별 말뚝 두부 최대 변위를 나타내며 이는 입력주파수별로 말뚝의 거동에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.
- [0125] **입력가속도**
- [0126] 입력가속도에 따른 해상 자켓 기초구조물의 동적 거동을 분석한다. 이를 위해 상대밀도 40%, 80%의 조건에서 입력주파수를 고유진동수와 같은  $1.0f_n$ 으로 고정하였다.
- [0127] 입력가속도를 상대밀도가 80%일 때는 0.098g~0.4g로 변화시키고, 상대밀도 40%일 때는 0.098g~0.3g로 변화시켜가며 실험을 수행한다. 이보다 큰 입력가속도를 수행하면 진동과 동시에 지반침하가 발생하여 이와 같이 입력가속도에 제한을 두었다.
- [0128] 도 26은 스위프 테스트(sweep test)를 통한 가속도 및 상대밀도별 말뚝 시스템의 고유진동수를 나타낸다. 입력가속도가 커질수록 말뚝 시스템의 고유진동수가 작게 나타나고, 상대밀도가 높을수록 고유진동수가 크게 나타남을 확인할 수 있다.
- [0129] 이는 입력하중의 증가 또는 상대밀도의 증가로 인하여 말뚝의 강성이 상대적으로 작아지기 때문으로 판단된다.
- [0130] 동적 p-y 이력곡선은 단순보 이론(simple beam theory)을 기반으로 말뚝의 깊이별로 측정된 휨모멘트에 따라 산정할 수 있다. 먼저, 깊이별 휨모멘트 분포 함수를 결정한 후 수학적 1과 같이 두 번 미분하여 지반 반력을 산정하고, 수학적 2와 같이 두 번 적분하여 말뚝의 변위를 산정하였다.
- [0132] **말뚝의 동적 p-y 곡선 작성법**
- [0133] 데이터를 측정된 0.001초의 시간 간격 마다, 말뚝의 깊이 별 모멘트 분포 함수를 결정하고 수학적 1 및 수학적 2와 같은 일반적인 빔(beam) 이론에 따라 지반 반력과 변위를 산정하였으며, 이 결과들을 하나의 그래프에 도시하여 동적 p-y 곡선을 작성하였다.
- [0134] 측정된 스트레인게이지로부터 말뚝 깊이에 따른 모멘트 분포함수를 결정하고 지반반력 p는 모멘트 곡선을 2번 미분하여 얻어지며 말뚝 변위 y는 모멘트 곡선을 2번 적분하여 얻어진다. 모멘트 분포곡선의 함수는 Cubic spline fitting 방법을 적용하여 구한다.
- [0135] 동적 p-y곡선을 구성하는 변위  $y$ 는 지반-말뚝 간 상대변위를 의미하므로, 지반 가속도계 측정 값을 2번 적분하여 자유장 지반변위를 산정하고, 말뚝 변위에서 지반 변위를 빼줌으로써 최종적으로 동적 p-y곡선을 작성하였다.
- [0137] 도 27 내지 도 30은 입력주파수에 따른 말뚝 깊이별 동적 p-y 곡선을 나타낸다. 고유진동수가 가까워질수록 말뚝의 변위가 증가함을 확인할 수 있으며, 동적 p-y 곡선의 할선기울기가 감소함을 확인할 수 있다.
- [0139] 도 31은 각 주파수별 p-y 곡선이다. 도 31에서 각 주파수별 p-y 곡선에서 최대점을 뽑아서 도 5 내지 도 10과 같이 한 그래프에 지반 반력과 말뚝변위 형태로 나타낸다.
- [0141] 1g 진동대 실험을 통하여 구한 다양한 주파수 및 가속도 범위의 동적 p-y 곡선으로부터 최대 지반 반력이 나타나는 꼭지점들을 찾아낸 후, 이 점들을 모두 연결하여, 등가정적해석에 적용할 수 있는 동적 p-y 곡선을 도출한다.

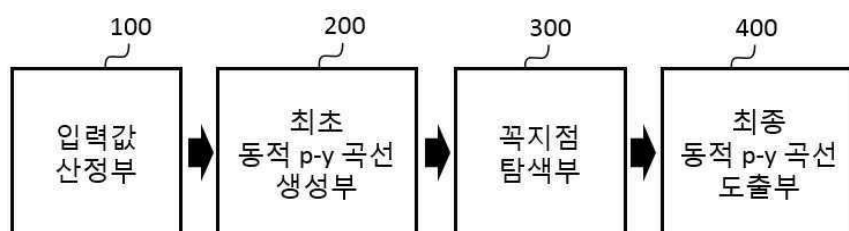
- [0142] 동적 p-y 곡선식을 산정하기 위하여 경험식의 골격을 수학적 식 3과 같은 쌍곡선함수로 결정한다.
- [0143] 본 발명에서는 동적 p-y 곡선의 초기 기울기와 극한 지반 반력을 구속압과 Rankine의 수동 토압계수를 이용한 함수를 제안한다.
- [0144] 동적 p-y 곡선의 초기 기울기(K)는 수학적 식 4와 같은 경험식으로 나타낸다.
- [0146] 도 5 내지 도 10은 회귀분석을 통하여 획득한 동적 p-y 중추곡선과 실험적으로 획득한 동적 p-y 곡선의 최대점을 나타낸다. 이를 통해, 동적 p-y 중추곡선이 지반-말뚝 시스템의 비선형성과 실험값을 잘 반영함을 알 수 있다.
- [0148] 도 11은 실험결과로부터 얻은 깊이별 초기 기울기를 나타낸다. 통계 상수 A를 결정하기 위하여 선형 회귀분석을 수행하였으며, 상대밀도 80% 일 때 A는 1414.8이며, 상대밀도 40%일 때 A는 995.94를 나타낸다.
- [0150] 최종적으로 초기기울기의 식은 상대밀도에 따라서 수학적 식 5와 수학적 식 6으로 제안된다.
- [0151] 동적 p-y 곡선의 극한 지반반력(Pa)를 제안하기 위하여 수동토압과 관련된 수학적 식 7을 이용하였다.
- [0152] 통계상수인 A와 n을 결정하기 위하여 수학적 식 7을 수학적 식 8과 같이 변형하여 log 스케일에서 선형 회귀분석을 수행하였다. 도 12는 선형 회귀분석을 위한 그래프를 나타낸다. 이를 통해서 최종적으로 극한 지반반력에 대한 경험식을 수학적 식 9 및 수학적 식 10과 같이 상대밀도에 따라 제안한다.
- [0154] 본 명세서에서 설명되는 실시예와 첨부된 도면은 본 발명에 포함되는 기술적 사상의 일부를 예시적으로 설명하는 것에 불과하다. 따라서, 본 명세서에 개시된 실시예들은 본 발명의 기술적 사상을 한정하기 위한 것이 아니라 설명하기 위한 것이므로, 이러한 실시예에 의하여 본 발명의 기술 사상의 범위가 한정되는 것은 아님은 자명하다. 본 발명의 명세서 및 도면에 포함된 기술적 사상의 범위 내에서 당업자가 용이하게 유추할 수 있는 변형예와 구체적인 실시 예는 모두 본 발명의 권리범위에 포함되는 것으로 해석되어야 할 것이다.

## 부호의 설명

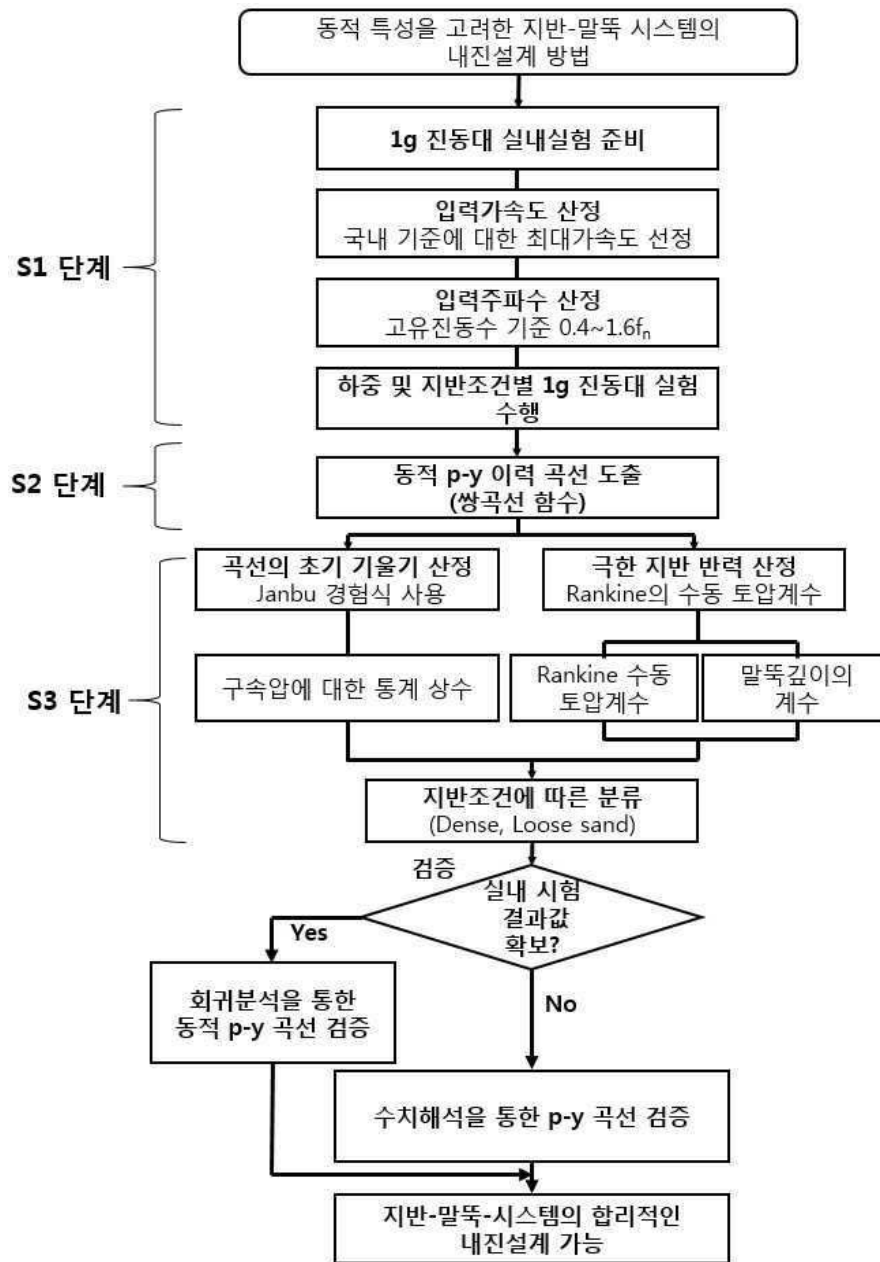
- [0155] 100 : 입력값 산정부  
110 : 입력주파수 산정부  
120 : 입력가속도 산정부  
200 : 최초 동적 p-y 곡선 생성부  
300 : 꼭지점 탐색부  
400 : 최종 동적 p-y 곡선 도출부

## 도면

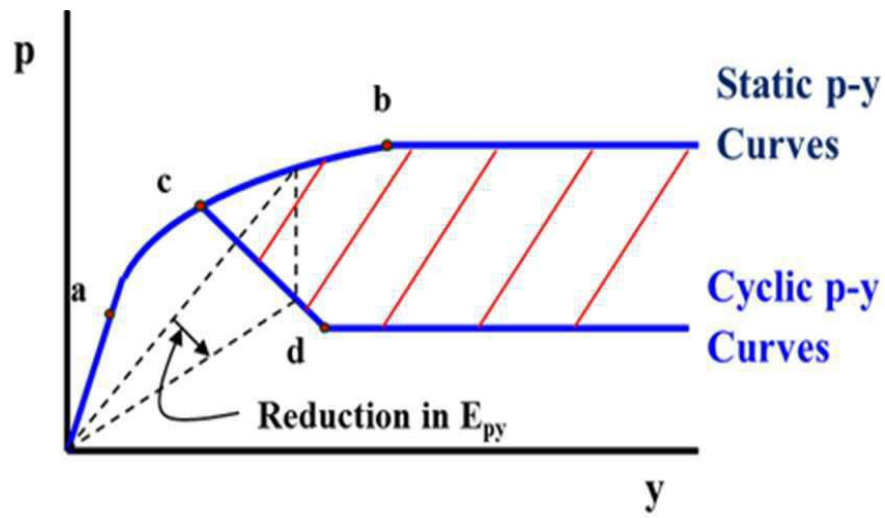
### 도면1



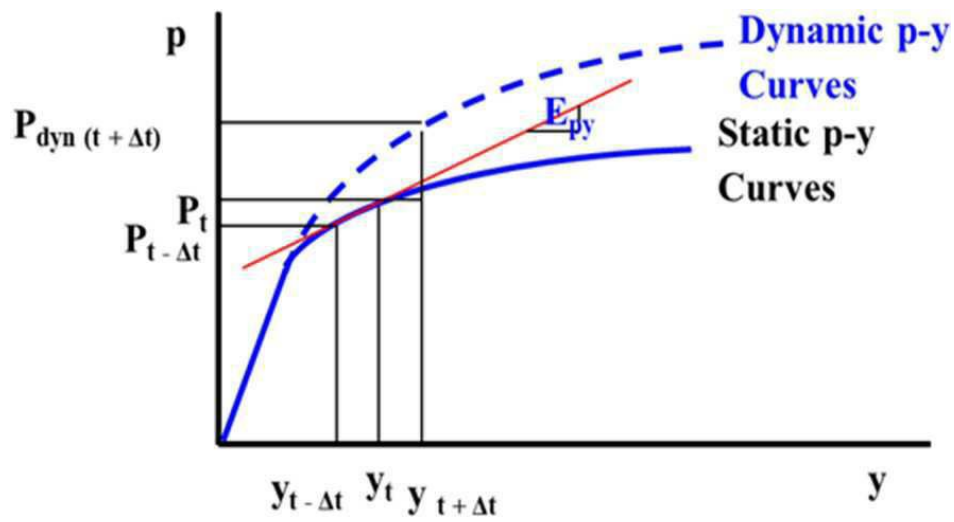
도면2



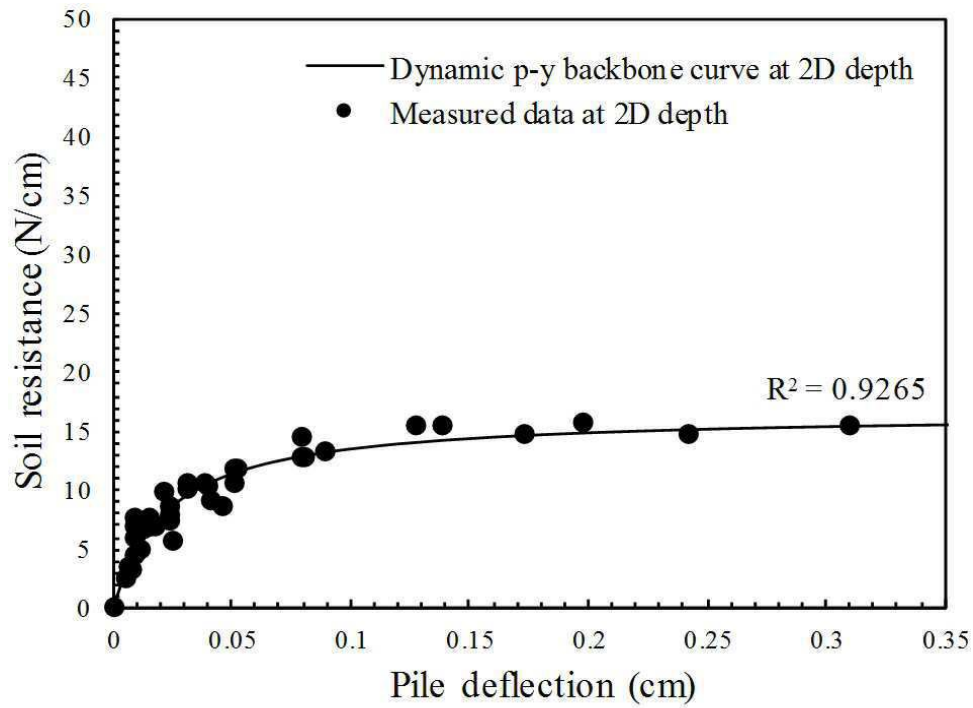
도면3



도면4

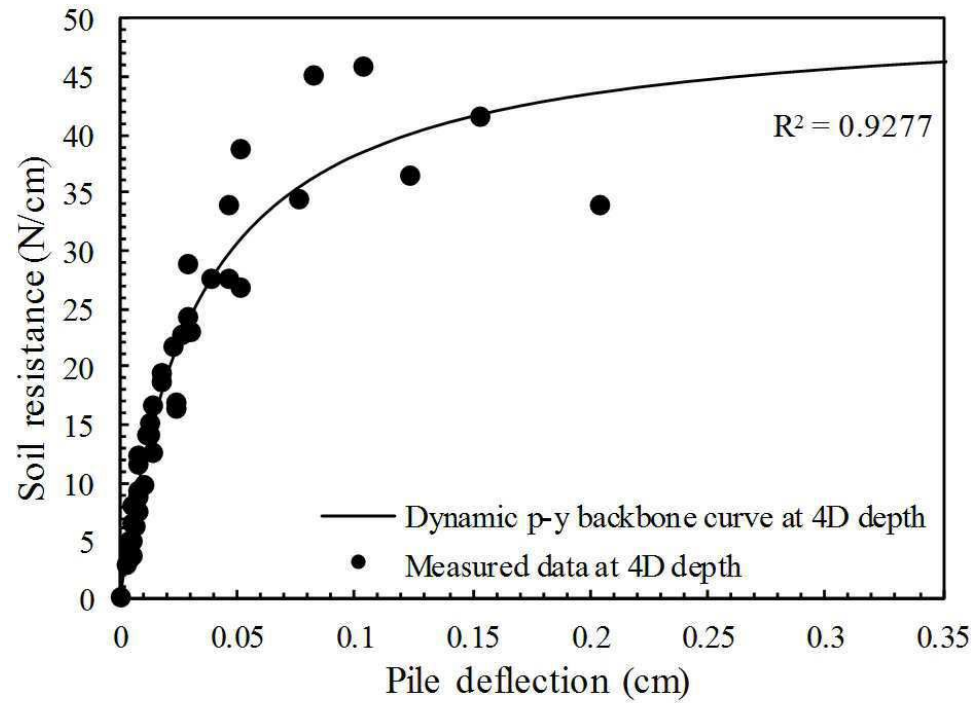


도면5



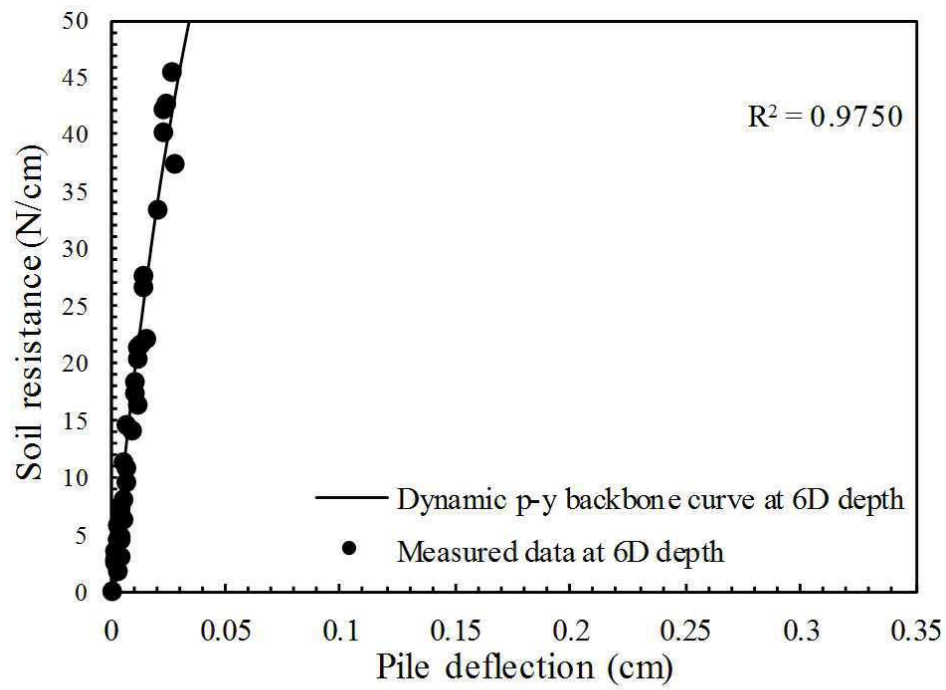
깊이 2D (Dr 80%)

도면6



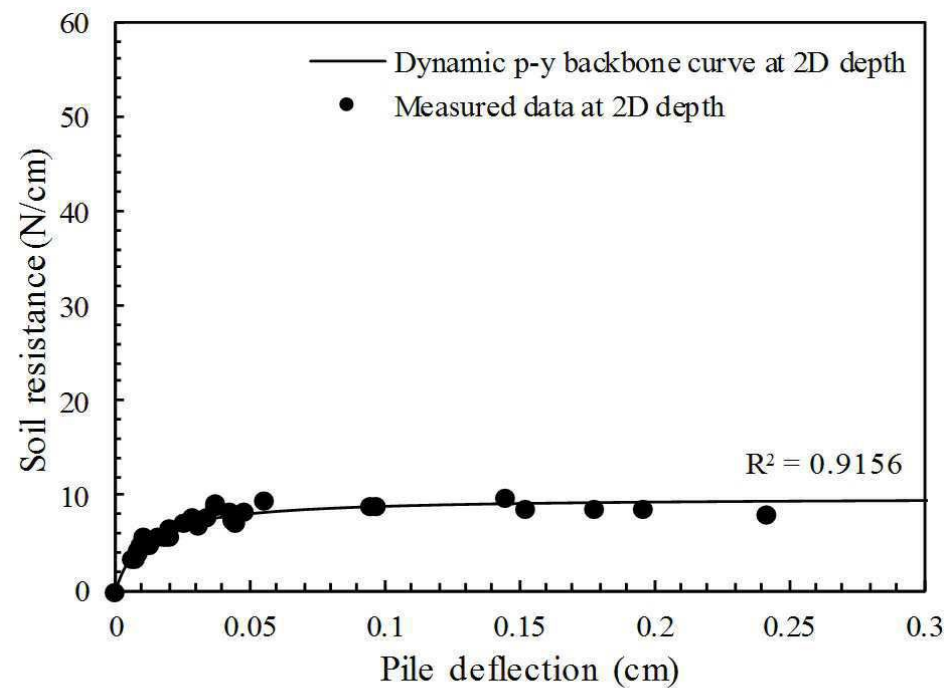
깊이 4D (Dr 80%)

도면7



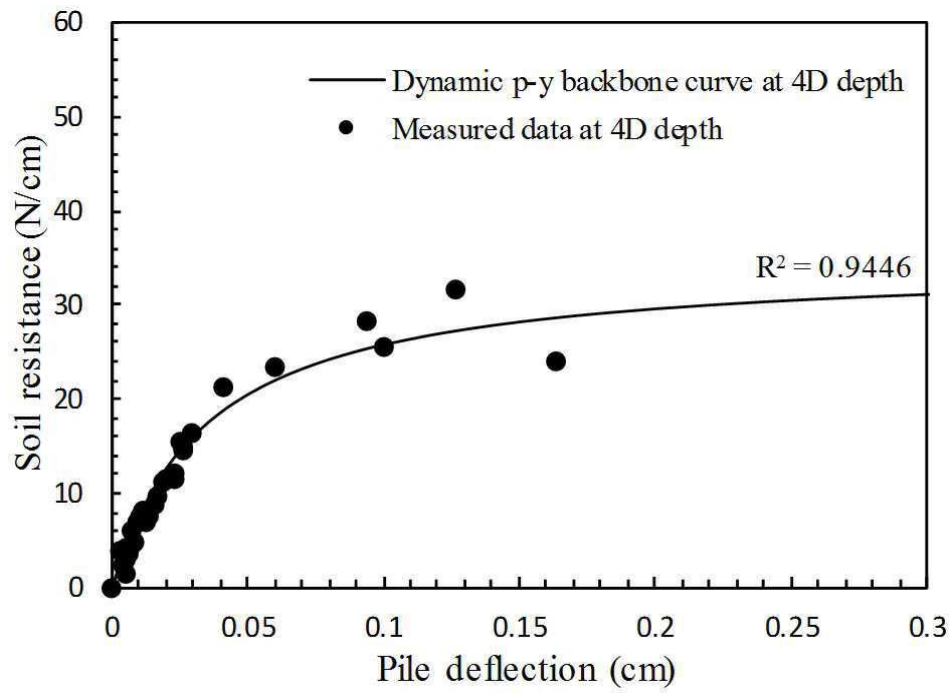
깊이 6D (Dr 80%)

도면8



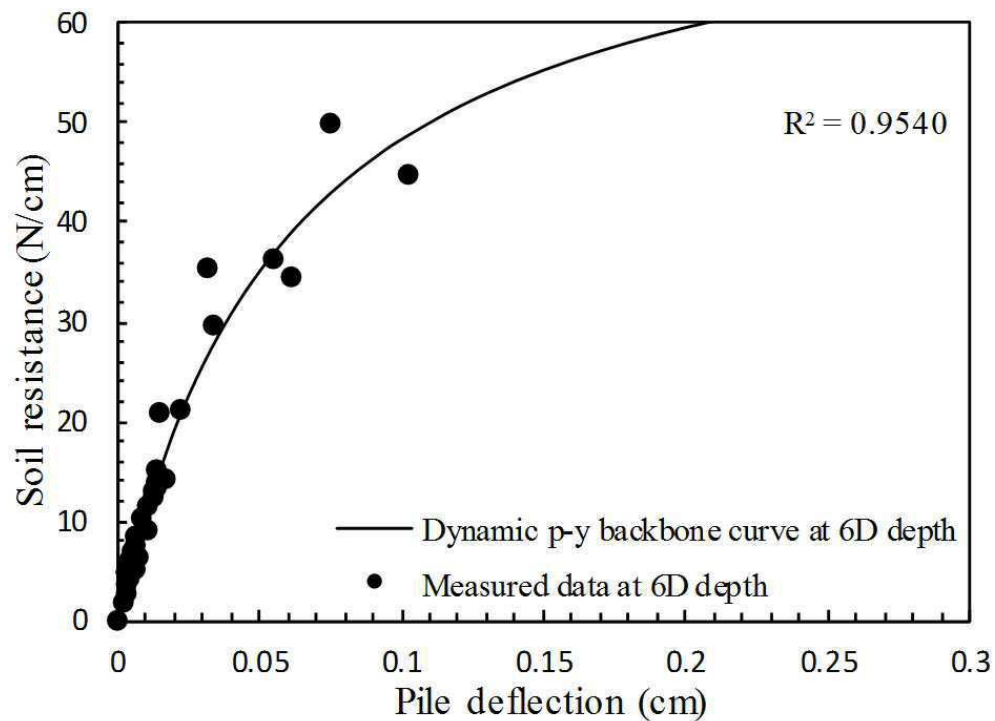
깊이 2D (Dr 40%)

도면9



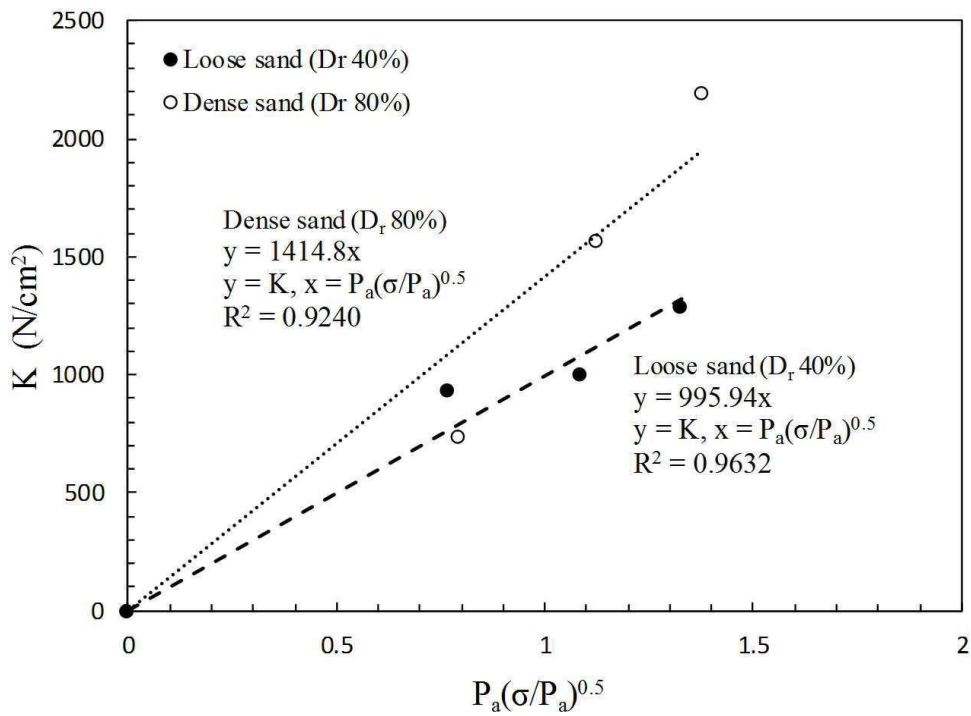
깊이 4D (Dr 40%)

도면10

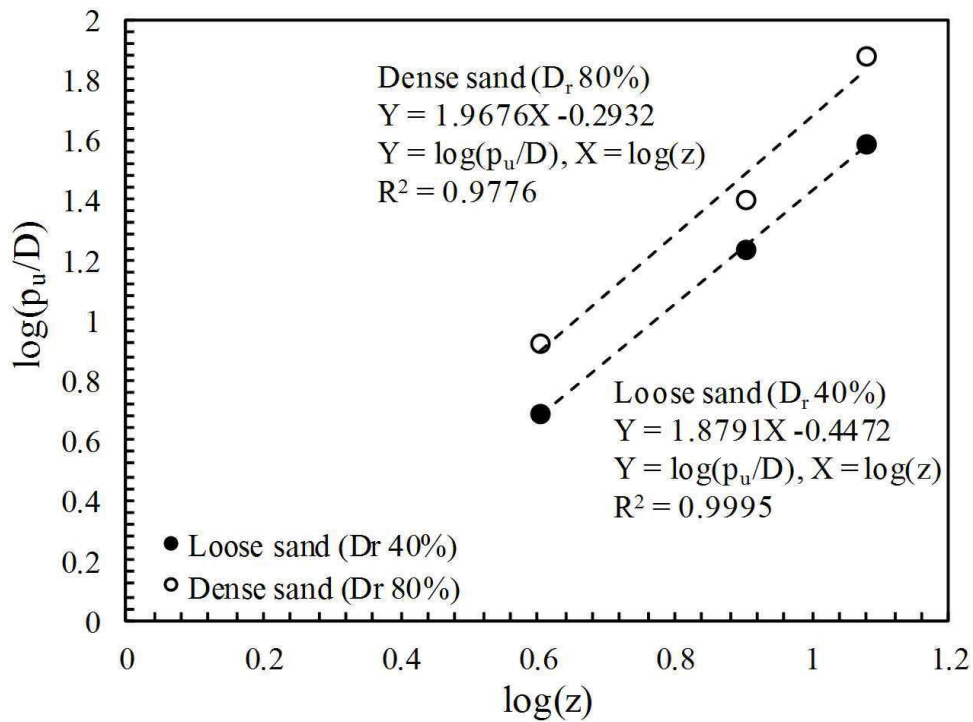


깊이 6D (Dr 40%)

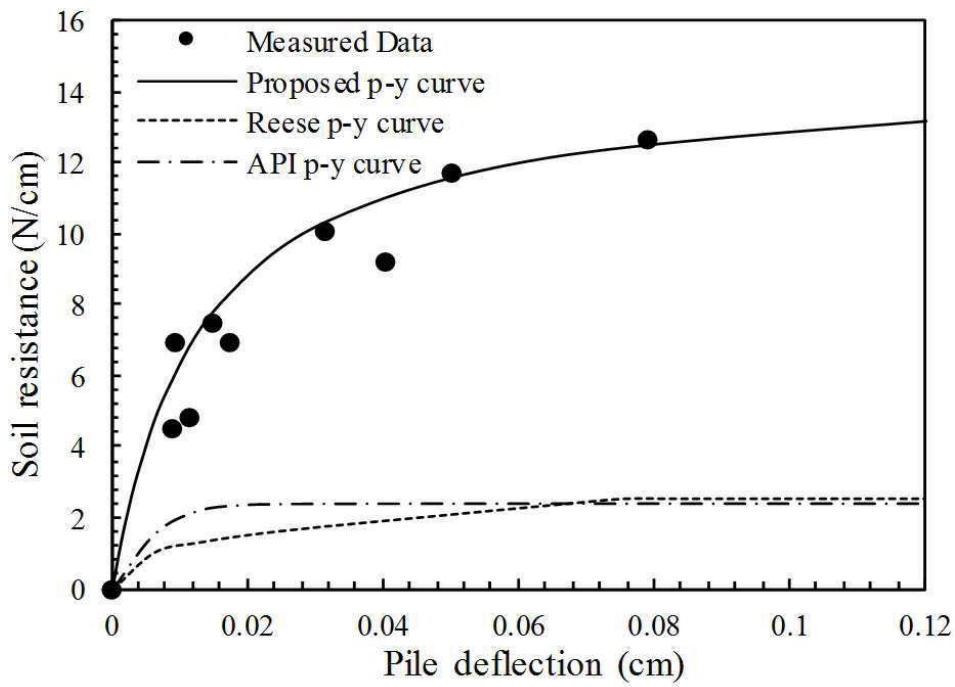
도면11



도면12

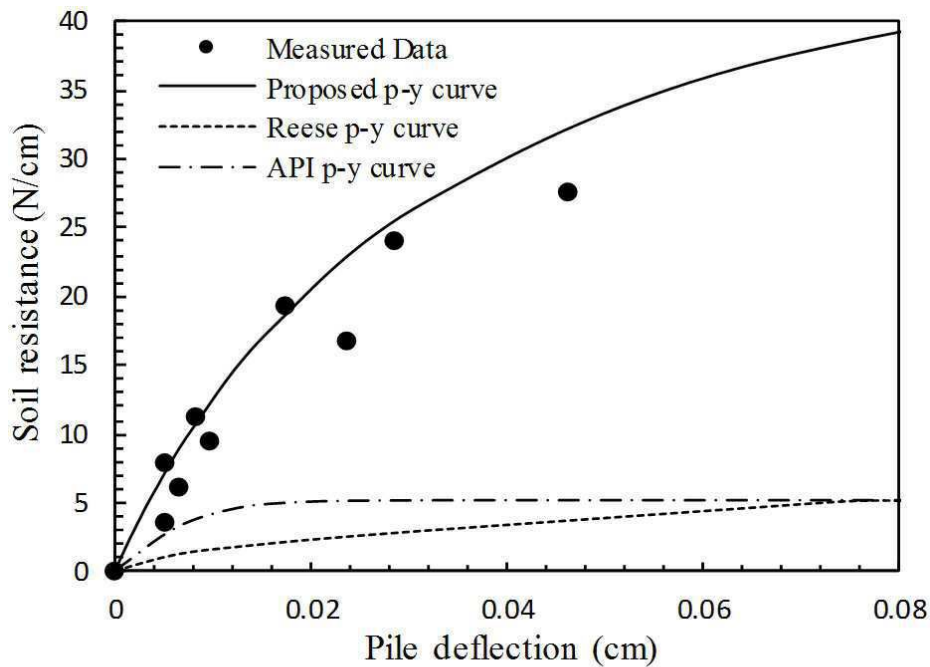


도면13



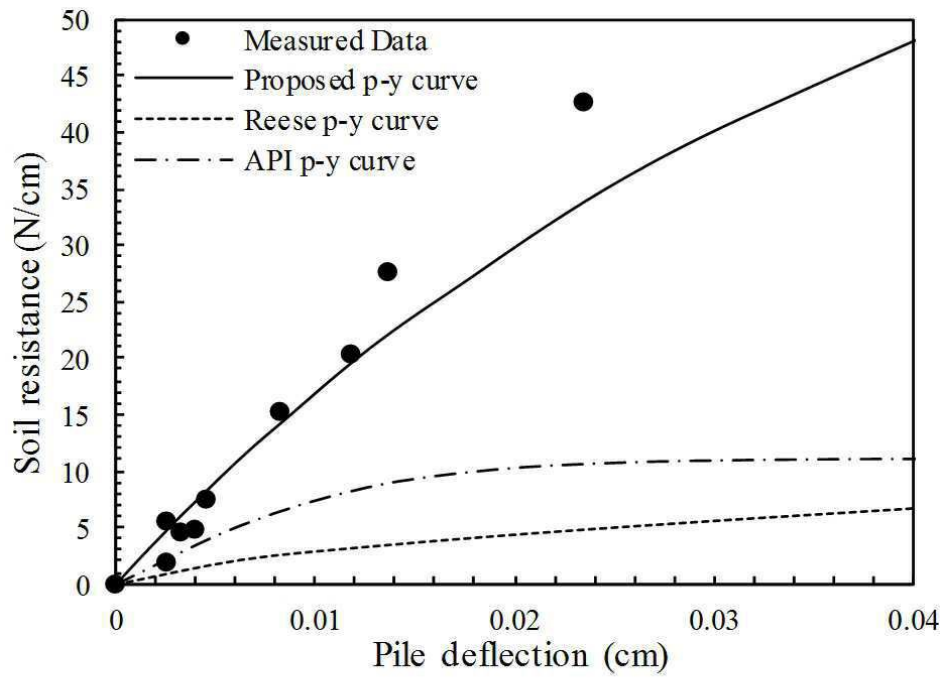
깊이 2D (Dr 80%)

도면14



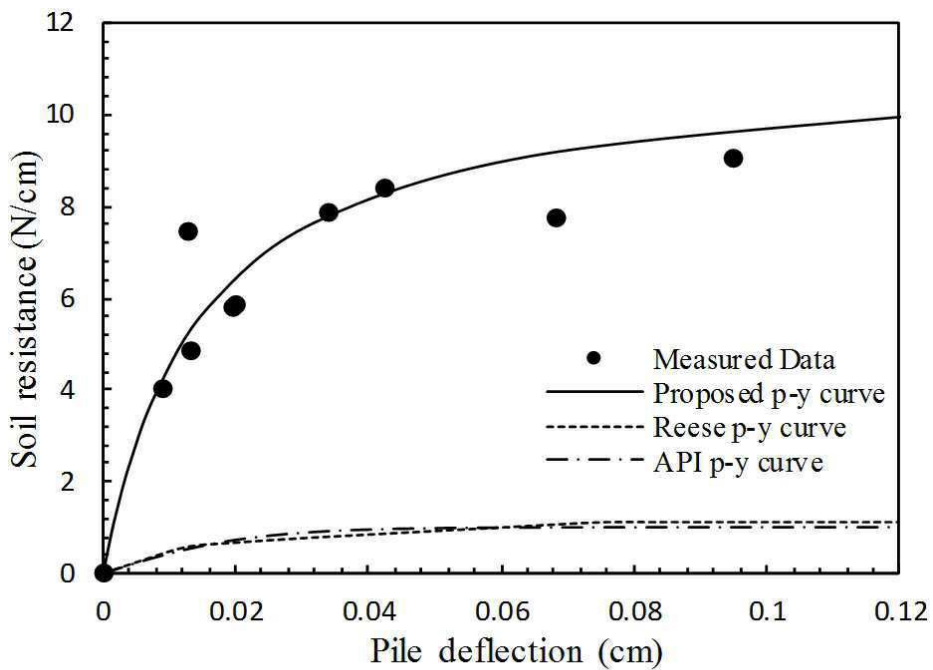
깊이 4D (Dr 80%)

도면15



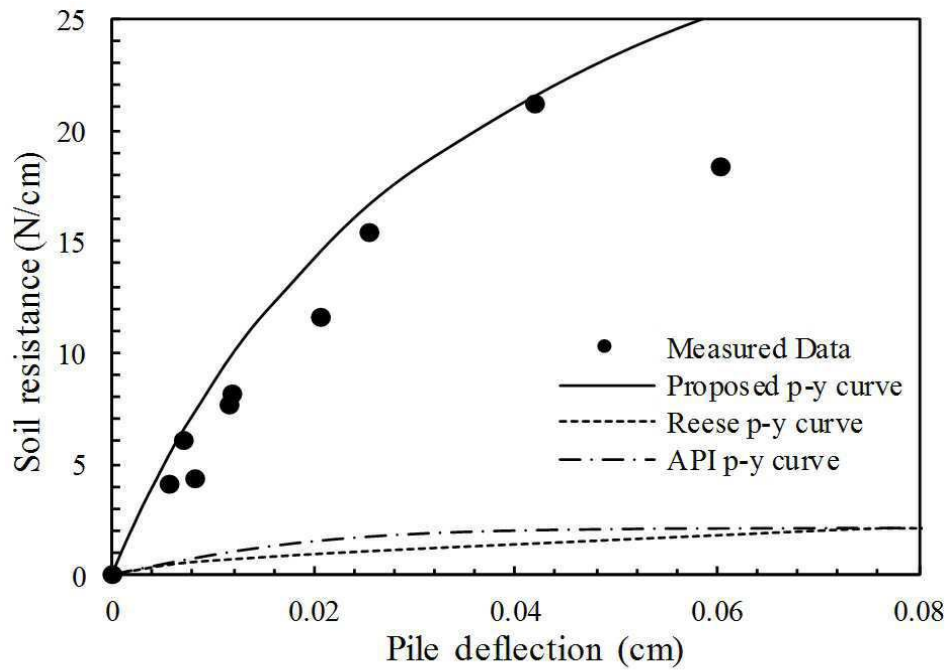
깊이 6D (Dr 80%)

도면16



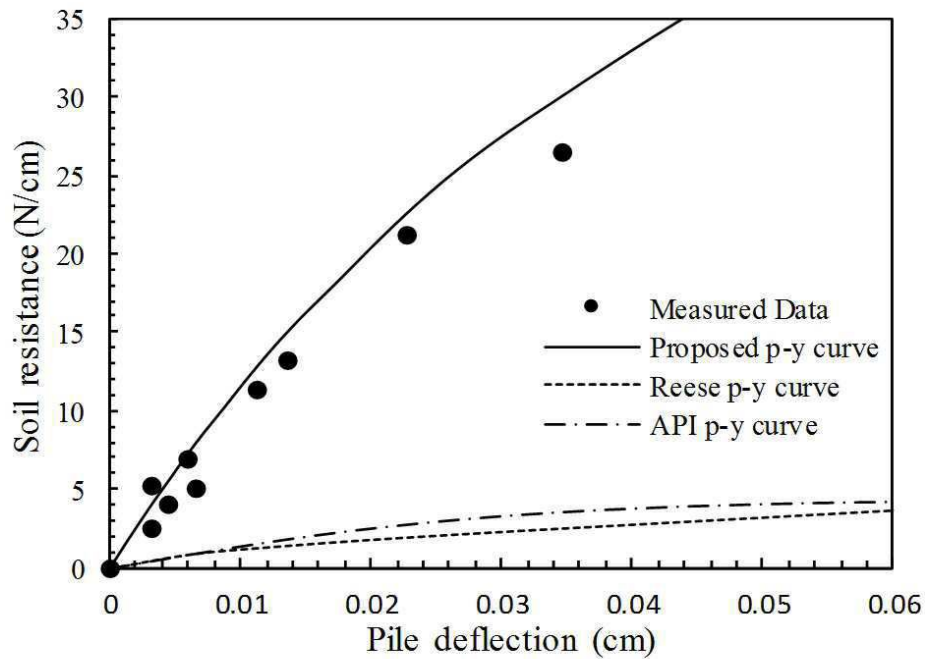
깊이 2D (Dr 40%)

도면17



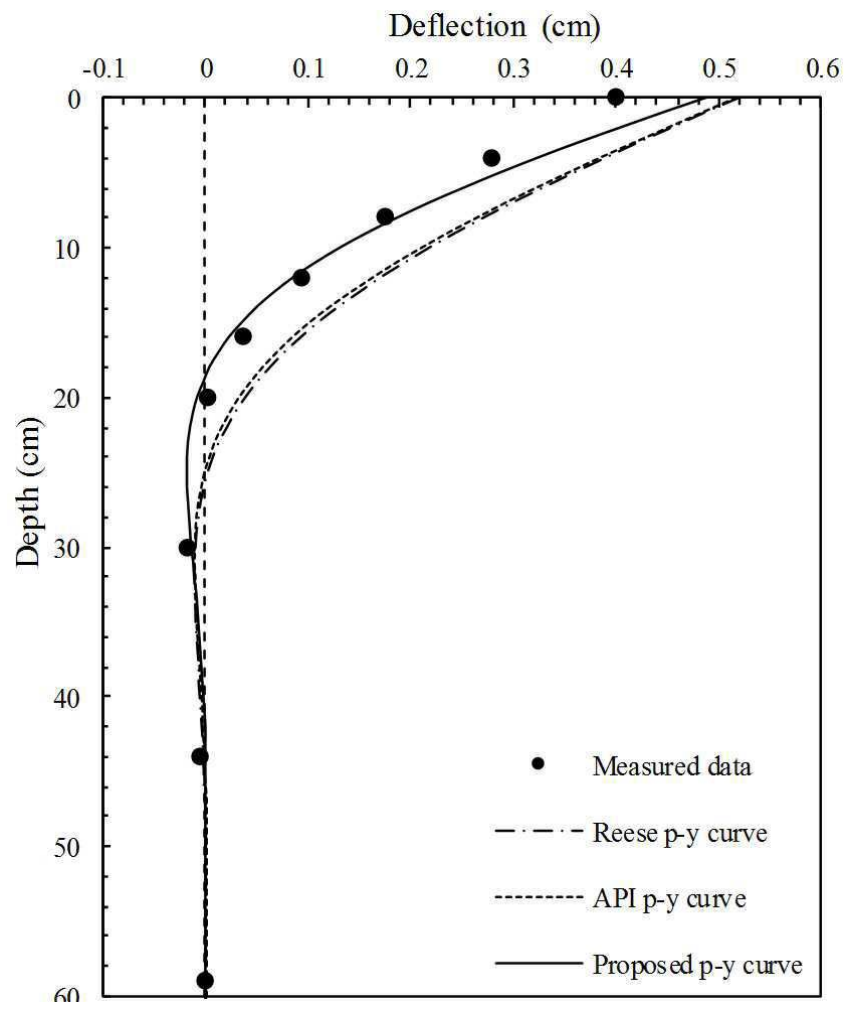
깊이 4D (Dr 40%)

도면18

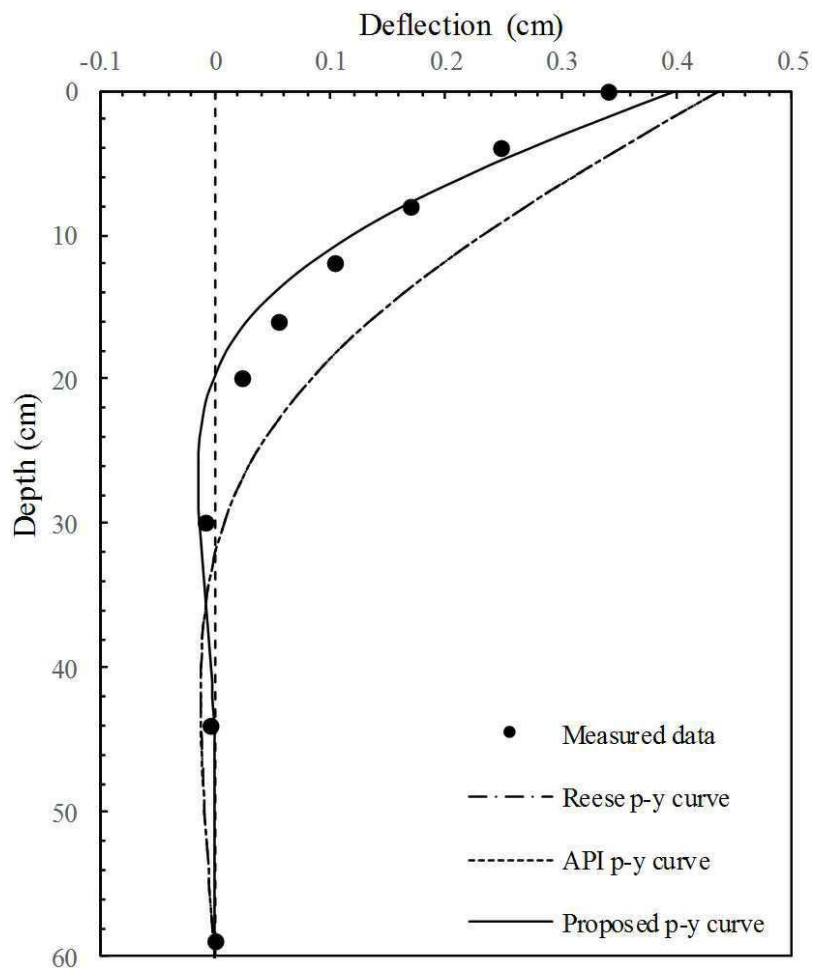


깊이 6D (Dr 40%)

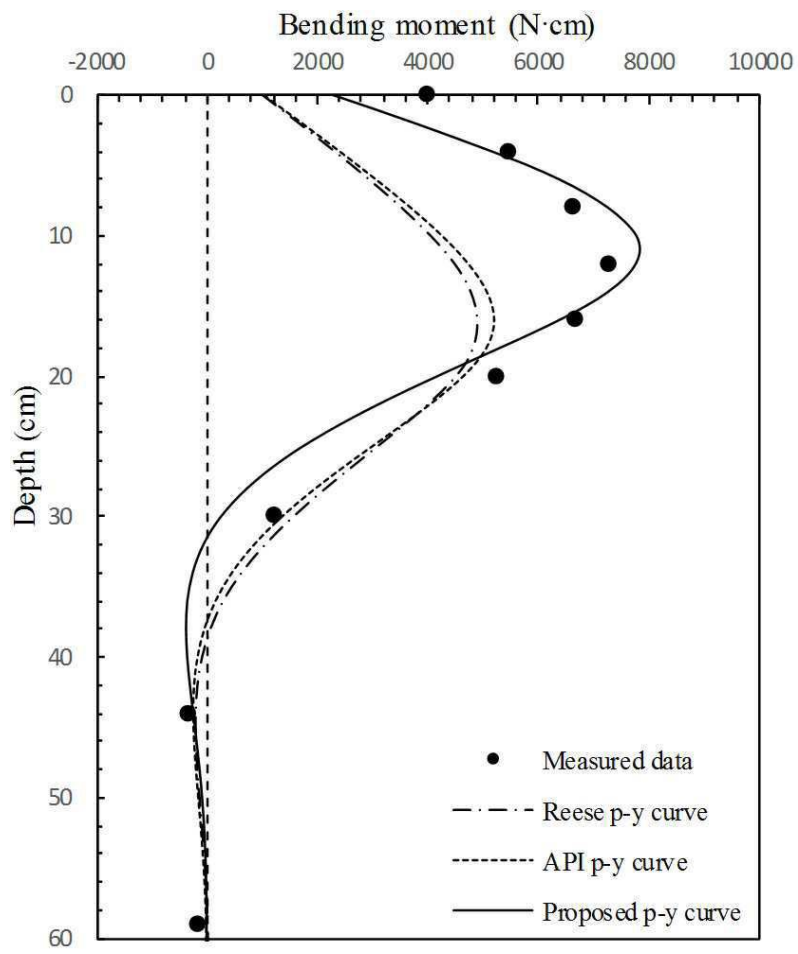
도면19



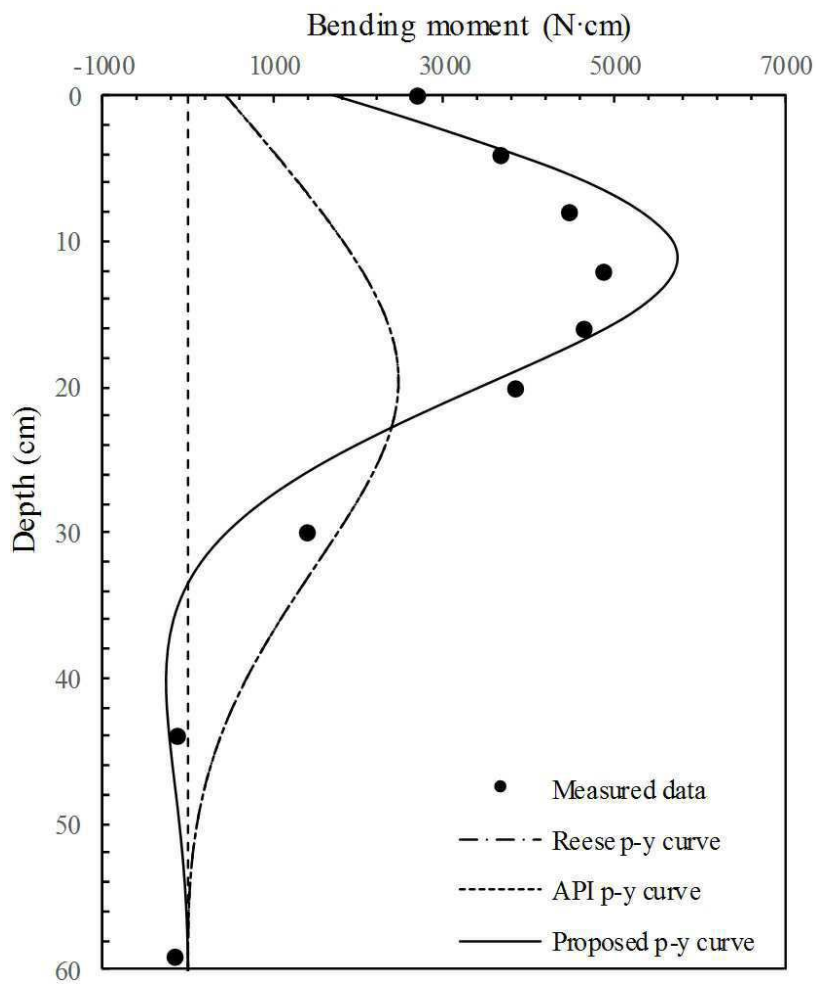
도면20



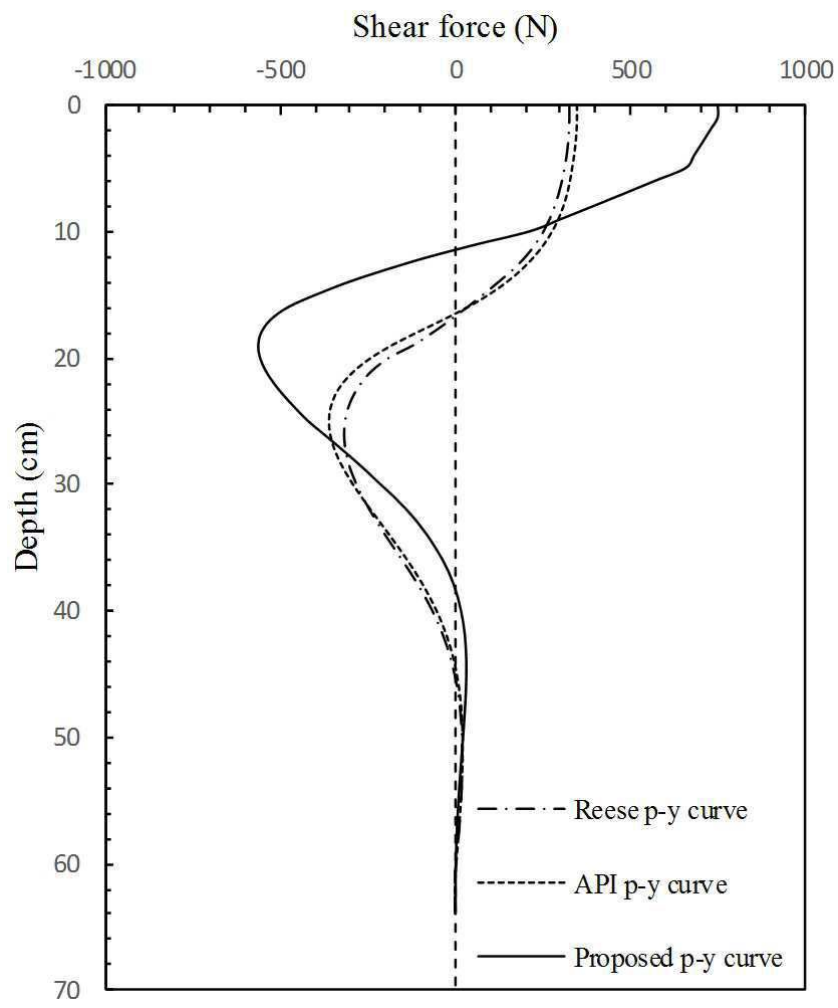
도면21



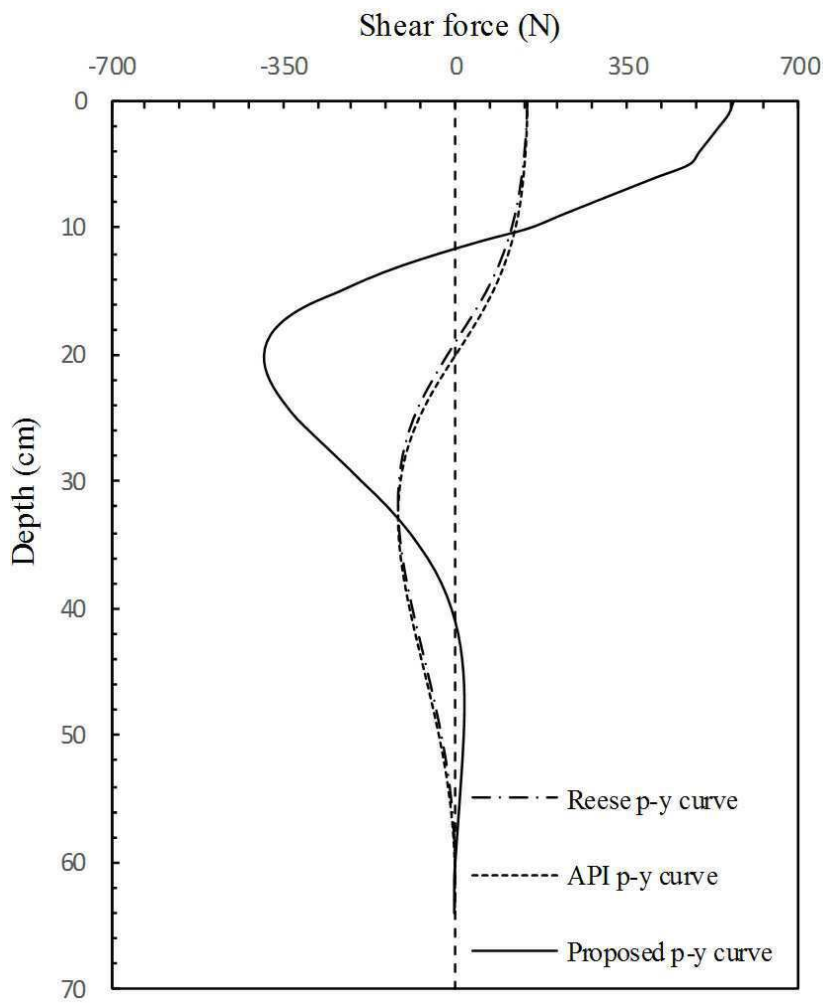
도면22



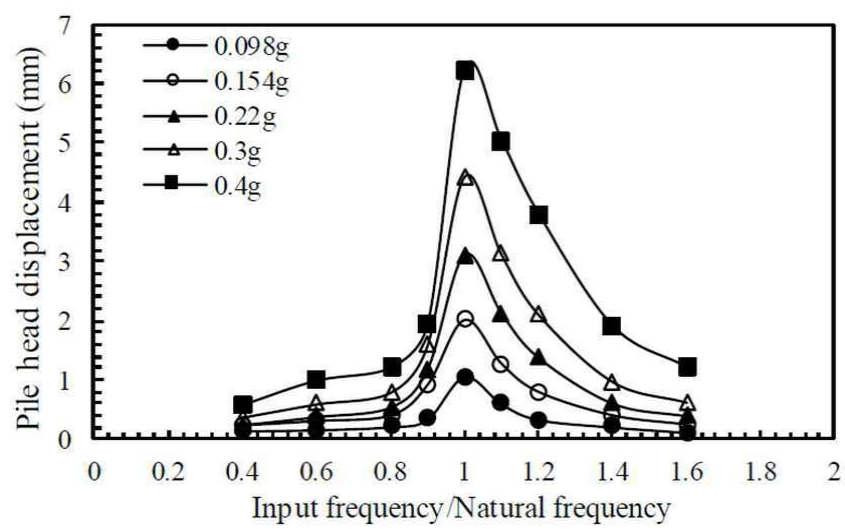
도면23



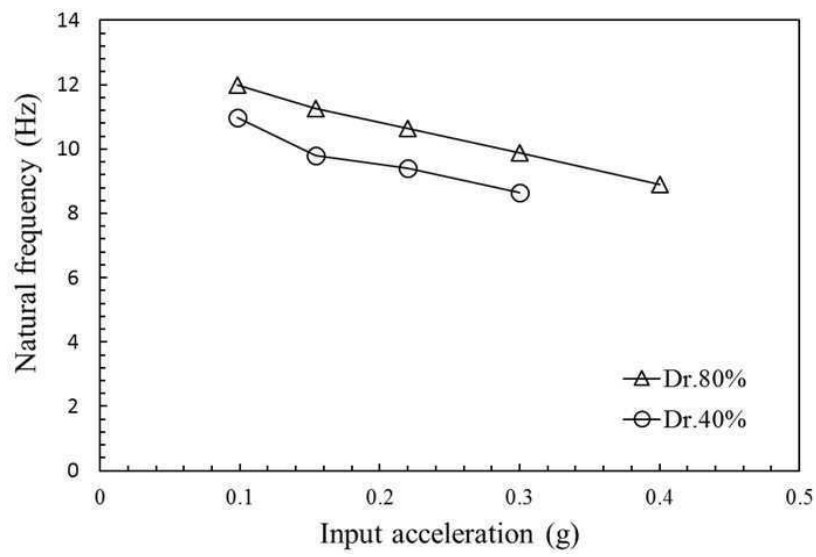
도면24



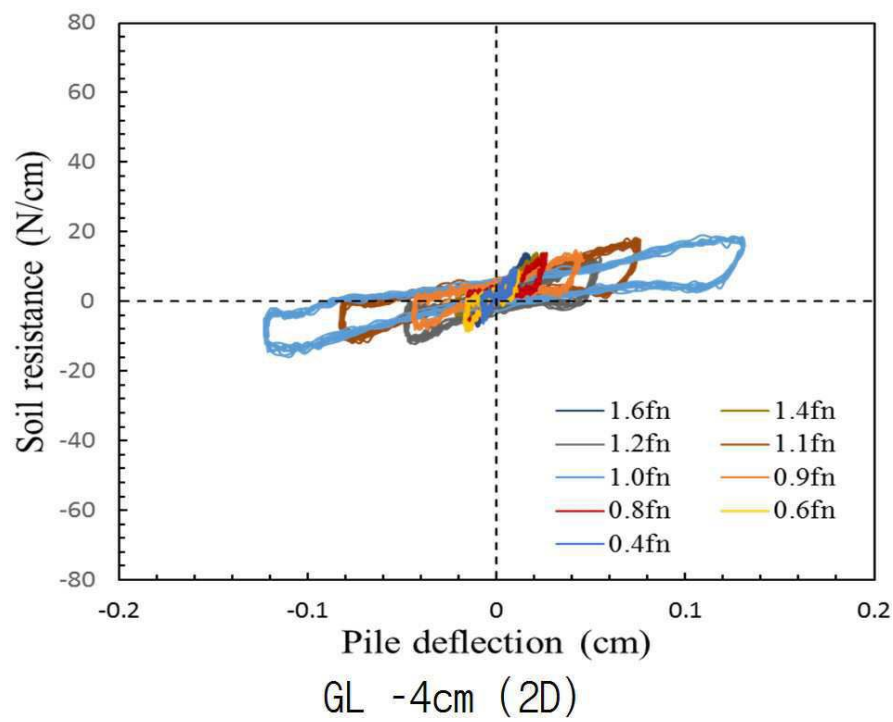
도면25



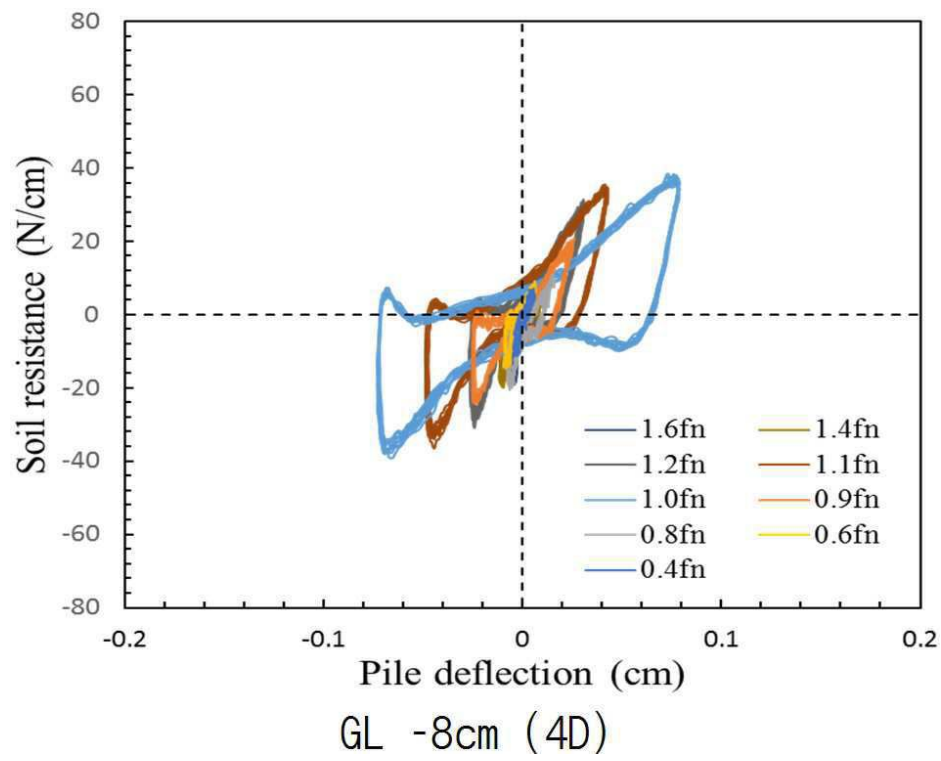
도면26



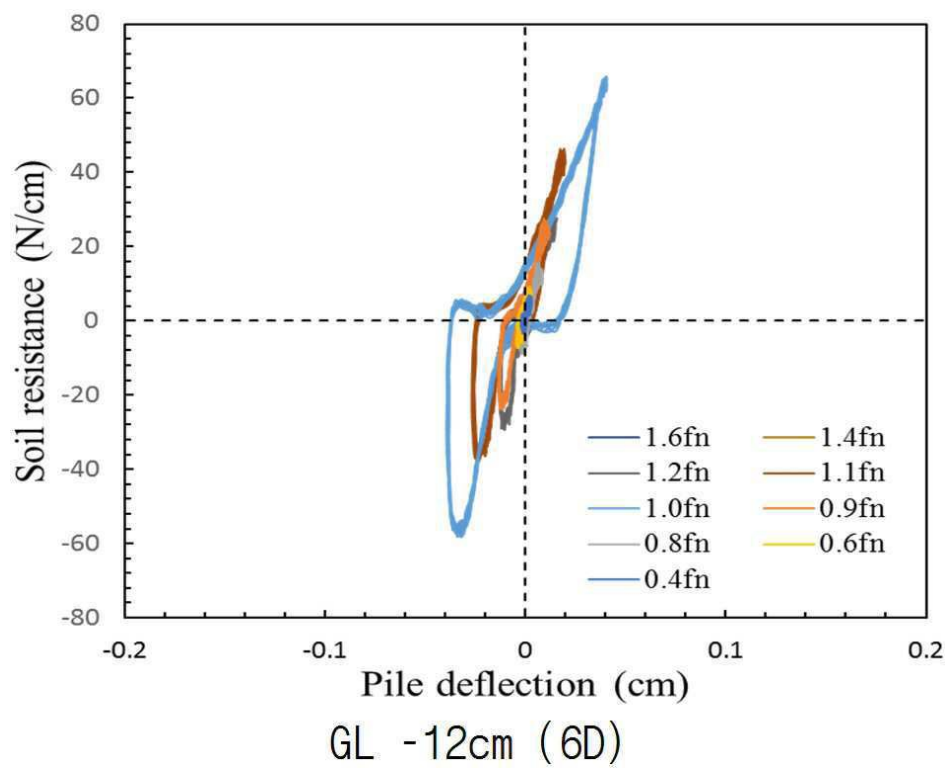
도면27



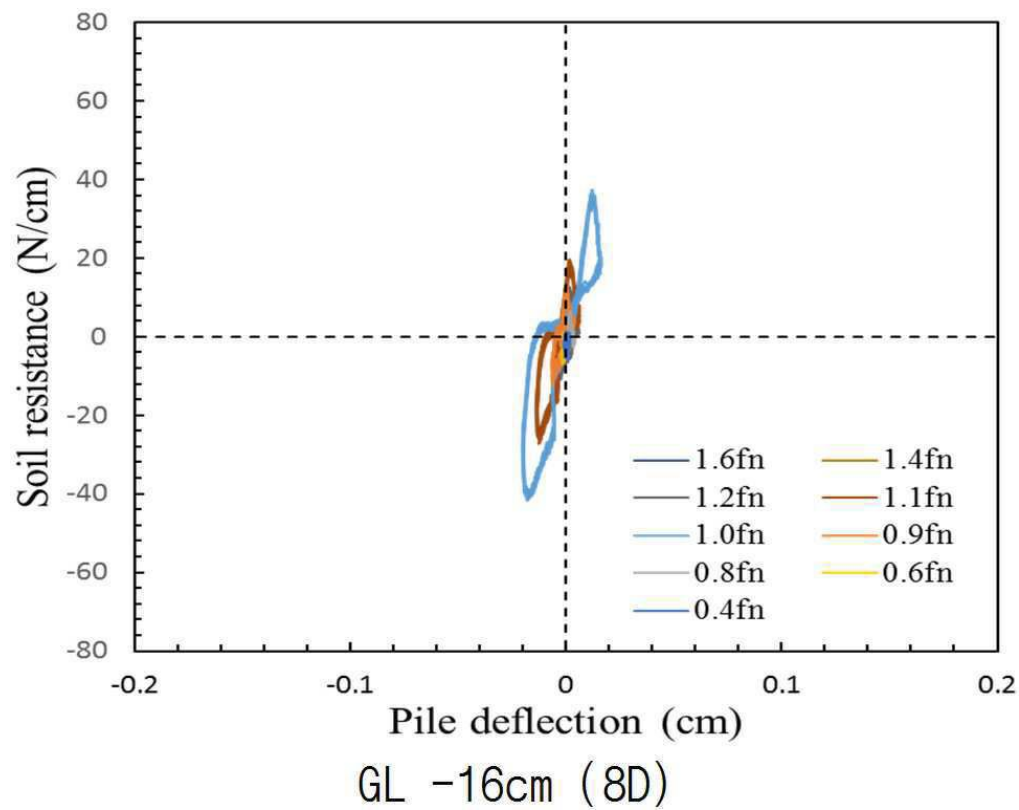
도면28



도면29



도면30



도면31

